



**Masterarbeit Nr.457**

# **Experimentelle Untersuchung einer neuartigen hybriden Coanda-Aktuierung an einem Stumpfkörper**

**Sven Bilges  
Matrikelnummer: 4689890**

Ausgegeben: Prof. Dr.-Ing. R. Radespiel  
Institut für Strömungsmechanik  
Technische Universität Braunschweig

Betreuer: Dr. Richard Semaan

Datum: 16.08.2018

# **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich, Sven Bilges, geb. am 05.04.1992, an Eides statt, die vorliegende Studienarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet zu haben.

Braunschweig, 16.08.2018

## **Zusammenfassung**

Eine neuartige hybride Aktuierungsmethode, bestehend aus Coanda Ausblasung und rotierenden Walzen, wurde experimentell auf ihre Fähigkeit zur Reduzierung des Widerstands eines D-förmigen Stumpfkörpers getestet. Dabei wurden ebenfalls unterschiedliche Rückseitenanbauten untersucht.

Der Widerstand konnte um bis zu 76% reduziert werden. Außerdem konnte ein Synergieeffekt zwischen Ausblasung und Walzen festgestellt werden, der die Effektivität der Walzen um bis zu 94% steigerte. Effizienzvergleiche zwischen den beiden Aktuierungsmethoden wurden gemacht. So benötigt die Aktuierung per Ausblasung bis zu 97% mehr Energie als die Aktuierung per Walzen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Eidesstattliche Erklärung</b>	i
<b>Nomenklaturverzeichnis</b>	iii
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	vi
<b>Tabellenverzeichnis</b>	1
<b>1. Einleitung</b>	2
1.1. Motivation . . . . .	2
1.2. Stumpfkörper Aerodynamik . . . . .	4
1.3. Aktive Strömungskontrolle durch Ausblasung . . . . .	7
1.4. Strömungskontrolle durch sich bewegende Fläche . . . . .	9
<b>2. Experimenteller Aufbau</b>	12
2.1. Windkanal . . . . .	12
2.2. Modell . . . . .	13
2.3. Widerstandsbestimmung . . . . .	19
2.4. Weitere Messtechnik . . . . .	23
2.5. Strömungsvisualisierung . . . . .	24
<b>3. Ergebnisse</b>	26
3.1. Referenzmessungen . . . . .	26
3.2. Konstante Aktuierung . . . . .	29
3.2.1. Reine Ausblasung . . . . .	29
3.2.2. Reine Rotation . . . . .	32
3.2.3. Kombinierte Aktuierung . . . . .	34
3.2.4. Einseitige Aktuierung . . . . .	47
3.3. Periodische Aktuierung . . . . .	53
<b>4. Zusammenfassung &amp; Ausblick</b>	56
<b>Literatur</b>	58
<b>A. Anhang</b>	60
A.1. Widerstandsmessung Matlab Code . . . . .	60
A.2. Datenblätter . . . . .	63

# Nomenklaturverzeichnis

Lateinische Formelzeichen

$\dot{m}$	Massenstrom	kg/s
$A_{ref}$	Referenzfläche	$m^2$
$b$	Breite	m
$C_\mu$	Momentumkoeffizient	-
$C_{Power}$	Leistungskoeffizient	-
$C_p$	Druckkoeffizient	-
$C_W$	Widerstandskoeffizient	-
$f$	Frequenz	Hz
$h$	Höhe	m
$I_{aus}$	ausgehender Impuls	Ns
$I_{ein}$	eingehender Impuls	Ns
$l$	Länge	m
$n$	Drehzahl	$min^{-1}$
$P$	Leistung	J
$p$	statischer Druck	Pa
$p_t$	Totaldruck	Pa
$q$	Dynamischer Druck	Pa
$r$	Radius	m
$Re$	Reynolds-Zahl	-
$St$	Strouhal-Zahl	-
$T$	Periodendauer	s
$V$	Geschwindigkeit	m/s
$V_{Zylinder}$	Umfangsgeschwindigkeit des Zylinders	m/s
$W$	Widerstandskraft	N

## Griechische Formelzeichen

$\nu$	Kinematische Viskosität	$kg/(m \cdot s)$
$\rho$	Dichte	$kg/m^3$

## Indizes

$\infty$	Freie Anströmung	-
$jet$	Ausblasung	-
$Pl$	Plenum	-
$W$	Walze	-

# Abbildungsverzeichnis

1.1.	Schematischer Verlauf der Strömung über (a) stromlinienförmige und (b) stumpfe Körper [2]	5
1.2.	(a) Einseitige und (b) zweiseitige Ablösung der Grenzschicht bei stumpfen Körpern [2]	6
1.3.	Strömungsvisualisierung für die natürliche Strömung (a) ohne Aktuierung und (b) mit Aktuierung bei $C_\mu = 0,009$ und $St = 0,15$ (b) [15]	9
1.4.	Von <i>Modi</i> [13] untersuchtes Prisma in den verschiedenen Einbaulagen	10
1.5.	Strömungsvisualisierung des von <i>Modi</i> [13] untersuchten D-Körpers mit (a) $V_{Zylinder}/V_\infty = 0$ , (b) $V_{Zylinder}/V_\infty = 2$ , (c) $V_{Zylinder}/V_\infty = 4$	10
1.6.	Strömungsvisualisierung des D-förmigen Stumpfkörpers von <i>Beaudoin u. a.</i> [1] bei (a) $V_{Zylinder}/V_\infty = 0$ und (b) $V_{Zylinder}/V_\infty = 2$	11
2.1.	Leiser Niedergeschwindigkeitskanal Braunschweig (LNB)	12
2.2.	Modellgeometrie des D-förmigen Stumpfkörpers und die Anordnung der vorhandenen Druckmessbohrungen	13
2.3.	Aktuierungsmechanismus des Stumpfenkörpermodells; Luft wird aus dem Plenum über die sich drehenden Walzen ausgeblasen	14
2.4.	Nach außen geführter Wellenabsatz wird über eine Sicherheitskupplung mit dem Gleichstrommotor verbunden; Abgedichtet per Bürstendichtung	15
2.5.	Abweichung des Ausblasungsdruckes vom Mittelwert in Spannweitenrichtung	16
2.6.	Druckverlauf im Rächen in mittiger Position, 30 mm nach links verschoben und 30 mm nach rechts geschoben; bei $P_{Pl} = 20 \text{ kPa}$ und $n = 1500 \text{ min}^{-1}$	16
2.7.	Vergleich des Druckverlaufs ohne Aktuierung und mit Aktuierung bei 10 kPa und 1500 $\text{min}^{-1}$	17
2.8.	Unterschied der Konfigurationen; (a) Basiskonfiguration (b) Konfiguration 1: Aluminium Anbau mit Spalt zwischen Hinterkante und Welle und (c) Konfiguration 2: PTFE Anbau ohne Spalt zwischen Hinterkante und Welle	18
2.9.	Konfiguration mit gezahnter Welle; Rotation der Wellen öffnet und schließt den Ausblasungsspalt periodisch	18
2.10.	Geschwindigkeitsverteilung im Nachlauf eines, in freier Strömung liegenden Körpers [14]	20
2.11.	Druckmessrächen zur Bestimmung von $C_w$	22
2.12.	Beispiel Druckverteilung des Nachlaufrächens	23
3.1.	$C_W$ -Werte für die Basiskonfiguration im Vergleich mit <i>Pastoor u. a.</i> [15] und <i>Koida u. a.</i> [12] für $Re = 35000$ bis $Re = 66000$	26
3.2.	Druckverteilung im Nachlauf der Basiskonfiguration bei $Re = 50000$	27
3.3.	Strömungsvisualisierung der Basiskonfiguration bei $Re = 50000$	27
3.4.	Druckverteilung $C_p$ für $Re = 35000$ in Basiskonfiguration ohne Aktuierung	28
3.5.	Druckverteilung $C_p$ für $Re = 66000$ in Basiskonfiguration ohne Aktuierung	28
3.6.	Druckverteilung $C_p$ auf der Basis für $Re = 35000$ bis $Re = 66000$ in Basiskonfiguration	29
3.7.	$C_W$ über $C_\mu$ bei reiner Ausblasung für die drei Konfigurationen bei $Re = 50000$	31
3.8.	$\Delta C_W$ über $C_{Power,jet}$ bei reiner Ausblasung für die drei Konfigurationen bei $Re = 50000$	31

3.9. Strömungsvisualisierung: Basiskonfiguration bei reiner Ausblasung mit $C_\mu = 0,95$ bei $Re = 50000$ . . . . .	32
3.10. $C_W$ über $n$ bei reiner Rotation für drei Konfigurationen bei $Re = 50000$ . . . . .	33
3.11. $\Delta C_W$ über $n$ bei reiner Rotation für drei Konfigurationen bei $Re = 50000$ . . . . .	33
3.12. Korrektur der $C_W$ -Werte der reinen Ausblasung durch lineare Interpolation für die Basiskonfiguration . . . . .	34
3.13. $C_W$ über $n$ bei kombinierter Aktuierung für verschiedene $C_\mu$ für die Basiskonfiguration bei $Re = 50000$ . . . . .	36
3.14. Strömungsvisualisierung: Basiskonfiguration bei kombinierter Aktuierung mit $C_\mu = 1,36$ und $n = 2500 \text{ min}^{-1}$ bei $Re = 50000$ . . . . .	37
3.15. $\Delta C_W$ über $n$ bei kombinierter Aktuierung für verschiedene $C_\mu$ für die Basiskonfiguration bei $Re = 50000$ . . . . .	37
3.16. $\Delta C_W$ über $C_{Power,jet}$ bei kombinierter Aktuierung für verschiedene $C_{Power,W}$ für die Basiskonfiguration bei $Re = 50000$ . . . . .	38
3.17. $\Delta C_W$ über $C_{Power,W}$ bei kombinierter Aktuierung für verschiedene $C_{Power,jet}$ für die Basiskonfiguration bei $Re = 50000$ . . . . .	38
3.18. $\Delta P/P_0$ über $n$ für unterschiedliche $C_\mu$ in der Basiskonfiguration bei $Re = 50000$ . . . . .	39
3.19. $C_W$ über $n$ bei kombinierter Aktuierung für verschiedene $C_\mu$ für Konfiguration 1 bei $Re = 50000$ . . . . .	40
3.20. $\Delta C_W$ über $n$ bei kombinierter Aktuierung für verschiedene $C_\mu$ für Konfiguration 1 bei $Re = 50000$ . . . . .	40
3.21. $\Delta C_W$ über $C_{Power,jet}$ bei kombinierter Aktuierung für verschiedene $C_{Power,W}$ für Konfiguration 1 bei $Re = 50000$ . . . . .	41
3.22. $\Delta C_W$ über $C_{Power,W}$ bei kombinierter Aktuierung für verschiedene $C_{Power,jet}$ für Konfiguration 1 bei $Re = 50000$ . . . . .	41
3.23. $\Delta P/P_0$ über $n$ für unterschiedliche $C_\mu$ in Konfiguration 1 bei $Re = 50000$ . . . . .	42
3.24. $C_W$ über $n$ bei kombinierter Aktuierung für verschiedene $C_\mu$ für Konfiguration 2 bei $Re = 50000$ . . . . .	43
3.25. $\Delta C_W$ über $n$ bei kombinierter Aktuierung für verschiedene $C_\mu$ für Konfiguration 2 bei $Re = 50000$ . . . . .	43
3.26. Strömungsvisualisierung: Konfiguration 1 bei kombinierter Aktuierung mit $C_\mu = 0,73$ und $n = 2500 \text{ min}^{-1}$ bei $Re = 50000$ . . . . .	44
3.27. $\Delta C_W$ über $C_{Power,jet}$ bei kombinierter Aktuierung für verschiedene $C_{Power,W}$ für Konfiguration 1 bei $Re = 50000$ . . . . .	45
3.28. $\Delta C_W$ über $C_{Power,W}$ bei kombinierter Aktuierung für verschiedene $C_{Power,jet}$ für Konfiguration 1 bei $Re = 50000$ . . . . .	45
3.29. $\Delta P/P_0$ über $n$ für unterschiedliche $C_\mu$ in Konfiguration 2 bei $Re = 50000$ . . . . .	46
3.30. Korrektur der $C_W$ -Werte der reinen, einseitigen Ausblasung durch lineare Interpolation für die Basiskonfiguration . . . . .	48
3.31. Druckverteilung im Rächen bei einseitiger Aktuierung mit $C_\mu = 2,12$ und $n = 2500 \text{ min}^{-1}$ in Basiskonfiguration . . . . .	48
3.32. $C_W$ über $n$ für unterschiedliche $C_\mu$ mit einseitiger Aktuierung in Basiskonfiguration bei $Re = 50000$ . . . . .	49
3.33. $\Delta C_W$ über $n$ für unterschiedliche $C_\mu$ mit einseitiger Aktuierung in Basiskonfiguration bei $Re = 50000$ . . . . .	50
3.34. $\Delta P/P_0$ über $n$ für unterschiedliche $C_\mu$ mit einseitiger Aktuierung in Basiskonfiguration bei $Re = 50000$ . . . . .	50
3.35. $C_W$ über $n$ für unterschiedliche $C_\mu$ mit einseitiger Aktuierung in Konfiguration 2 bei $Re = 50000$ . . . . .	51
3.36. $\Delta C_W$ über $n$ für unterschiedliche $C_\mu$ mit einseitiger Aktuierung in Konfiguration 2 bei $Re = 50000$ . . . . .	52
3.37. $\Delta P/P_0$ über $n$ für unterschiedliche $C_\mu$ mit einseitiger Aktuierung in Konfiguration 2 bei $Re = 50000$ . . . . .	52
3.38. $C_W$ über $n$ für unterschiedliche $C_\mu$ mit gezahnter Welle bei $Re = 50000$ . . . . .	54

3.39.  $\Delta P/P_0$  über  $n$  für unterschiedliche  $C_\mu$  mit gezahnter Welle bei  $Re = 50000$  55

# Tabellenverzeichnis

3.1.	Referenzwiderstände für die drei Konfigurationen bei $Re = 50000$ . . . . .	29
3.2.	$C_\mu$ für die verschiedenen Konfigurationen und Plenumsdrücke . . . . .	30
3.3.	$C_\mu$ für die verschiedenen Konfigurationen bei kombinierter Aktuierung . . .	34
3.4.	Zusammentragung der Ergebnisse zum Vergleich der Konfigurationen . . .	47

# 1. Einleitung

## 1.1. Motivation

Ziel dieser Arbeit ist es, den Widerstand eines Stumpfkörpermodells mit einer neuartigen Aktuierungsmethode im Leisen Niedergeschwindigkeits Kanal der TU Braunschweig zu senken. Diese neue Methode ist eine Kombination aus Coanda Ausblasung und sich drehenden Walzen, welche in ein Modell aus vorangegangen Untersuchungen des Institut für Strömungsmechanik integriert wird. Durch die Kombination dieser Aktuierungen wird ein Synergieeffekt erwartet, durch den sich die Effektivität im Vergleich zu den einzelnen Mechanismen erhöhen sollen. Die Geometrie des Körpers entspricht einem gestreckten D und der Mechanismus wird symmetrisch in beide Hinterkanten verbaut. Durch unterschiedliche Walzen Varianten soll außerdem eine konstante und auch eine periodische Aktuierung möglich sein. Außerdem werden verschiedene Rückseitenanbauten getestet, um die optimale Geometrie der Basis zu bestimmen. Für die Auswertung wurden sowohl Druckmessungen auf dem Körper selbst, als auch im Nachlauf per Druckmessrächen gemacht.

Der Luftwiderstand von aerodynamischen Körpern spielt bei dessen Auslegung eine große Rolle. Während bei stromlinienförmigen Körpern der Druckwiderstand klein ist, stellt dieser bei Stumpfkörpern einen deutlich größere Anteil dar. Zwar wird der Körper bei geringer Reynolds-Zahl vom Reibungswiderstand dominiert, doch wenn die Reynolds-Zahl einen kritischen Wert erreicht, kommt es zu Ablösungen, die eine geringe Druckrückgewinnung an der Hinterkante und die Bildung von Wirbeln zur Folge haben. Diesen Phänomenen folgt eine Erhöhung des Druckwiderstandes, der in diesem Fall den Löwenanteil des Gesamtwiderstandes darstellt. Betrachtet man nun einen Lastkraftwagen, dessen Geometrie einem Stumpfkörper entspricht, lässt sich durch die Reduzierung des Druckwiderstandes die Transporteffizienz erhöhen, wenn man bedenkt, dass je nach Geschwindigkeit 40-70% der LKW Leistung dazu benötigt wird, um den Luftwiderstand zu überwinden [13]. Der wohl simpelste Ansatz, um eine solche Widerstandsreduzierung zu realisieren, wäre eine Stromlinienform, welche allerdings in vielen Fällen nicht möglich oder einfach unpraktikabel ist. Eine weitere passive Maßnahme wäre die Veränderung der Hinterkantengeometrie,

so wie es *Choi u. a.* [4] vorgestellt haben. Diese Arbeit distanziert sich jedoch von solchen passiven Maßnahmen und betrachtet lediglich die aktive Kontrolle der Strömung.

Für die aktive Strömungskontrolle gibt es verschiedene Ansätze, wie z.B. Ausblasung und Absaugung. Hier ist es möglich, dies als konstante oder periodische Aktuierung umzusetzen. Außerdem kann anstatt reiner Ausblasung oder Absaugung eine alternierende Kombination aus beidem erstellt werden. Solch aktive Kontrollen haben im Bereich der Flugzeugaerodynamik in der Regel das Ziel, die Ablösung der Strömung zu verhindern bzw. zu verzögern, um so einen höheren Auftrieb zu generieren. Mit diesem Ziel haben *Günther u. a.* [7] und *Petz und Nitsche* [16] das Verhalten von Flügeln untersucht, die eine senkrechte Ausblasung an einer Hinterkantenklappe besitzen. Beide Arbeiten nutzten dabei eine periodische Ausblasung, wobei von Günther u.a. zusätzlich eine sinusförmige Ausblasung und Absaugung untersucht wurden. Es gelang sowohl Günther u.a. als auch Petz und Nitsche eine signifikante Erhöhung der maximalen Auftriebs. Anders als den Strahl senkrecht auszustoßen, lässt sich dieser auch tangential ausstoßen und an einer sogenannten Coandafläche entlangführen. Einige Beispiele für die Realisierung dieser Variante und dessen Effekte auf Flügelgeometrien sind in der Arbeit von *Radespiel u. a.* [17] gegeben. So kann z.B. die Coandafläche mit einer Hinterkantenklappe kombiniert werden. Hierdurch ist es möglich, die Strömung auch bei sehr stark ausgelenkter Klappe an dieser lang zu führen, ohne dass sie ablöst.

Während Flügel einen variablen Ablösepunkt besitzen, ist es bei Stumpfkörpern mit ausgeprägter Hinterkante so, dass diese einen festen Ablösepunkt, eben an dieser Hinterkante, besitzen. In einem solchen Fall dient die aktive Strömungskontrolle dem Zweck, das Totwassergebiet zu beeinflussen, um eine bessere Druckrückgewinnung und einen geringeren Widerstand zu generieren. Ein Beispiel dafür ist in der Arbeit von *Freund und Mungal* [5] gegeben. Hier wurde ein achsensymmetrischer Stumpfkörper mit verschiedenen Coanda Ausblasungen untersucht. Durch die Maßnahmen gelang es, den Widerstand im Vergleich zur Referenzkonfiguration um 30% zu reduzieren. Einen anderen Ansatz ohne Coandaflächen verfolgten *Pastoor u. a.* [15]. Hier wurden Lautsprecher in den Hinterkanten eines D-förmigen Stumpfkörpers genutzt, um eine massenstromlose Geschwindigkeit zu induzieren.

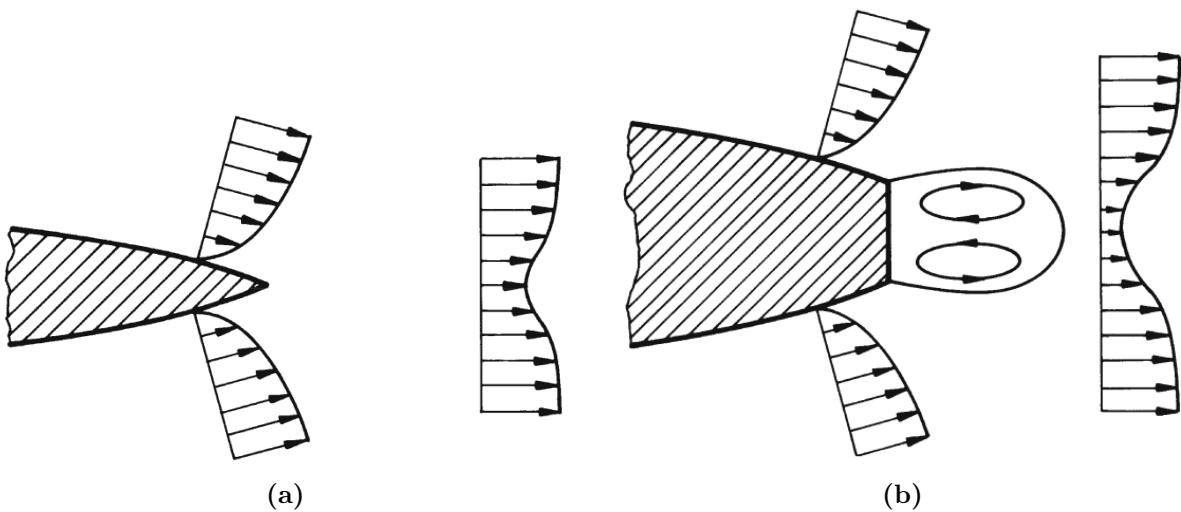
Eine andere Möglichkeit für aktive Strömungskontrolle sind sich bewegende Flächen, auch Moving Surface Boundary-Layer Control (MSBC) genannt. Der Effekt einer solchen Aktuierung ist zum einen die Verhinderung des Wachstums der Grenzschicht durch die Minimierung der Relativgeschwindigkeiten zwischen Oberfläche und freier Strömung und zum anderen das Induzieren von Impulsen in die vorhandene Grenzschicht [13]. Eine solche Aktuierung kann z. B., wie in der Arbeit von *Modi* [13], durch sich drehende Walzen

realisiert werden. Der Autor hat eine oder zwei solcher Walzen an verschiedenen Stellen eines symmetrischen Flügelprofils positioniert und dessen Einfluss bei verschiedenen Umdrehungsgeschwindigkeiten auf den Auftrieb untersucht. Außerdem wurden sowohl Stumpfkörper als auch ein LKW-Modell auf die Möglichkeit untersucht, den Luftwiderstand mit diesem Prinzip zu reduzieren. Weitere Untersuchungen zur Aktivierung durch Walzen wurden durch *Beaudoin u. a.* [1] gemacht. Hier wurden zwei Walzen in die Hinterkanten eines D-förmigen Stumpfkörpers integriert. Es gelang, die Ablösung der Strömung deutlich zu verzögern und somit die sich bildenden Wirbel zu verkleinern oder sogar komplett verschwinden zu lassen.

## 1.2. Stumpfkörper Aerodynamik

Um einen stumpfen Körper von einem schlanken zu unterscheiden, können verschiedene Aspekte betrachtet werden. So werden Körper als stumpf bezeichnet, wenn die Dimensionen senkrecht zur Strömungsrichtung vergleichbar sind mit denen längs zur Strömungsrichtung, also wenn die Körper eine hohe Dicke aufweisen. Dies hat zur Folge, dass auch ein schlanker Körper, wie zum Beispiel eine ebene Platte, zu einem Stumpfkörper wird, wenn der Anstellwinkel groß ist. Auch werden Körper als stumpf bezeichnet, dessen Länge-zu-Dicke-Verhältnis zwar groß ist, sie aber stumpfe Hinter- oder Vorderkanten besitzen. Abgesehen von solch geometrischen Eigenschaften lassen auch aerodynamische Eigenschaften Aufschluss über die Art der Körpers geben. So ist ein Körper stromlinienförmig, wenn sein Widerstand vom Reibungswiderstand dominiert wird, während ein von Druckwiderstand dominierter Körper stumpf genannt wird.

Bei schlanken, stromlinienförmigen Körpern haftet die Strömung in der Regel an dem Körper und es bildet sich eine Grenzschicht. Während die Strömungsgeschwindigkeit auf der Körperoberfläche in dieser Grenzschicht Null ist, passt sie sich, umso weiter sie von der Oberfläche entfernt ist, immer weiter der Anströmgeschwindigkeit an. Innerhalb der Grenzschicht sind Scherspannungen vorhanden, die zu einer Kraft führen, die in Strömungsrichtung auf den Körper wirkt, bekannt als Reibungswiderstand. Im Gegensatz dazu kann die Strömung stumpfen Körper in der Regel nicht folgen, was zum Ablösen der Strömung führt und ein Totwassergebiet mit sich bringt. In diesem entstehen Wirbel und der Druck sinkt. Die Kombination aus diesem Druckabfall und dem erhöhten Druck am Staupunkt des Körpers führen zu einer Kraft in Strömungsrichtung, genannt Druckwiderstand. In Abbildung 1.1 ist schematisch die Strömung über stromlinienförmige und stumpfe Körper dargestellt.



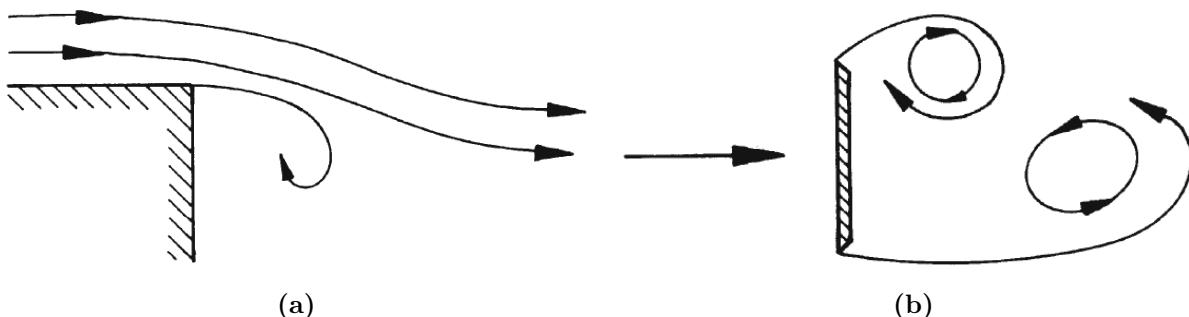
**Abbildung 1.1.:** Schematischer Verlauf der Strömung über (a) stromlinienförmige und (b) stumpfe Körper [2]

Das Phänomen der Strömungsablösung und Wirbelentstehung soll im Folgenden genauer betrachtet werden. Ein Körper in einer Strömung hat immer eine Umlenkung des Fluids zur Folge. Diese Umlenkung bringt, abhängig von der Geometrie, bis zum Erreichen der breitesten Stelle des Körpers eine Beschleunigung der Strömung mit sich. Eine solche Beschleunigung führt zu einer Absenkung des statischen Drucks und zu einer Erhöhung der kinetischen Energie der Fluidteilchen in der Grenzschicht. Gleichzeitig wird die wandnahe Grenzschicht in Folge von Reibung mit der Körperoberfläche abgebremst und verliert hierdurch wiederum kinetische Energie. Nach dem Passieren der breitesten Stelle entschleunigt die Strömung und der Druck steigt wieder. Kommt es nun dazu, dass die kinetische Energie der Fluidteilchen nicht mehr ausreicht, um mit dem Druckanstieg der entschleunigten Strömung zu folgen, stoppen Teilchen in der Grenzschicht komplett oder bewegen sich rückwärts. Dies hat ein Ablösen der Strömung von der Oberfläche zur Folge. Die Position der Ablösung hängt von der Reynolds-Zahl und der Art der Grenzschichtströmung ab. Grundsätzlich bedeutet eine Erhöhung der Reynolds-Zahl eine Wanderung der Position stromaufwärts, jedoch kann eine turbulente Grenzschicht diesen wieder stromabwärts treiben. Bei turbulenten Schichten findet quer zur Strömungsrichtung ein intensiver Impulsaustausch statt, der dafür sorgt, dass im wandnahen Bereich kinetische Energie zugeführt wird, wodurch ein höherer Druckgradient bewältigt werden kann.

Während ein zu steiler Druckgradient der Grund zum Ablösen bei stumpfen Körpern ohne scharfe Hinterkante ist, wie zum Beispiel bei einem Zylinder, reißt die Strömung bei Körpern mit scharfer Hinterkante eben genau an dieser ab. Man erwartet bei solchen Körpern eine Unabhängigkeit des Widerstandes von der Reynolds-Zahl. Zwar verringert sich diese Abhängigkeit, aber vorhanden ist sie dennoch. Denn die Reynolds-Zahl beeinflusst noch

immer den Mischvorgang in den Scherschichten und somit auch den Druckrückgewinn im Totwasser. Zusätzliche Effekte, die dazu führen, dass der Widerstand nicht Reynolds-Zahl abhängig ist, sind zum einen der Umschlagspunkt von laminarer zu turbulenter Grenzschicht und die Möglichkeit, dass sich eine Ablöseblase bei geringem  $Re$  bilden kann.

Nach Ablösen der Strömung bei einem Stumpfkörper wandelt sich die Grenzschicht in eine Scherschicht zwischen dem Hauptstrom und dem Windschatten des Körpers um, die einen großen Einfluss auf die Struktur der abgelösten Strömung hat. Durch turbulentes Durchmischen dieser Scherschicht, mit dem darunter liegenden, ruhenden Fluid wird ein Impuls in die Totwasserregion gegeben, der das Abscheiden von Wirbeln mit sich trägt. Unterteilen lässt sich dies in einseitige oder zweiseitige Ablösung der Strömung, siehe Abbildung 1.2.



**Abbildung 1.2.:** (a) Einseitige und (b) zweiseitige Ablösung der Grenzschicht bei stumpfen Körpern [2]

Im Falle der einseitigen Ablösung zieht die, sich an der Hinterkante bildende Scherschicht die oberste Schicht des darunter liegenden Volumens mit sich in Richtung der Strömung. Dies hat eine Druckreduzierung des restlichen Volumens zur Folge. Der reduzierte Druck zieht die sich verbreiternde Scherschicht nach unten. Es entsteht eine Totwasserregion. Bei zweiseitiger Ablösung besteht eine starke Wechselwirkung zwischen den zwei Scherschichten der Ober- und Unterseite. Es entsteht ein kurzes Totwassergebiet mit großer Wirbelstärke und sehr geringem Druck. Der von der Scherschicht eingebrachte Impuls begünstigt das Wachstum von Wirbeln, wodurch sich neue Wirbel an der Hinterseite des Körpers bilden. Während ein Wirbel in seiner Größe wächst, verändert sich die Position seines Zentrums stark. Hat der Wirbel eine bestimmte Größe erreicht, saugt dieser die Scherschicht der anderen Seite ein, welche eine Rotation in entgegengesetzter Richtung aufweist. Dies führt zum Abscheiden des Wirbels mit anschließender Neubildung eines Neuen auf der anderen Seite. Dieser Prozess geht vorlaufend weiter und erzeugt somit eine so genannte Kármánsche Wirbelstraße. Die Frequenz, mit der sich die Wirbel von

einem Stumpfkörper abscheiden, kann über die dimensionslose Strouhal-Zahl beschrieben werden:

$$St = \frac{f \cdot h}{V_\infty}, \quad (1.1)$$

wobei  $f$  die Wirbelablösefrequenz ist,  $h$  die Körperhöhe und  $V_\infty$  die freie Anströmgeschwindigkeit. Wie von *Pastoor u. a.* [15] beschrieben, liegt die Strouhal-Zahl von Stumpfkörpern bei 0,2 für Zylinder und 0,26 für kurze D-förmige Körper.

Anders als bei der Flügelaerodynamik, wird bei der Arbeit mit Stumpfkörper nicht die Sehnenlänge als relevantes Maß zur Normierung genutzt, sondern die Körperhöhe. So gilt zum Beispiel für die Reynolds-Zahl:

$$Re = \frac{V_\infty \cdot h}{\nu}, \quad (1.2)$$

wobei  $\nu$  die kinematische Viskosität des Fluids ist.

### 1.3. Aktive Strömungskontrolle durch Ausblasung

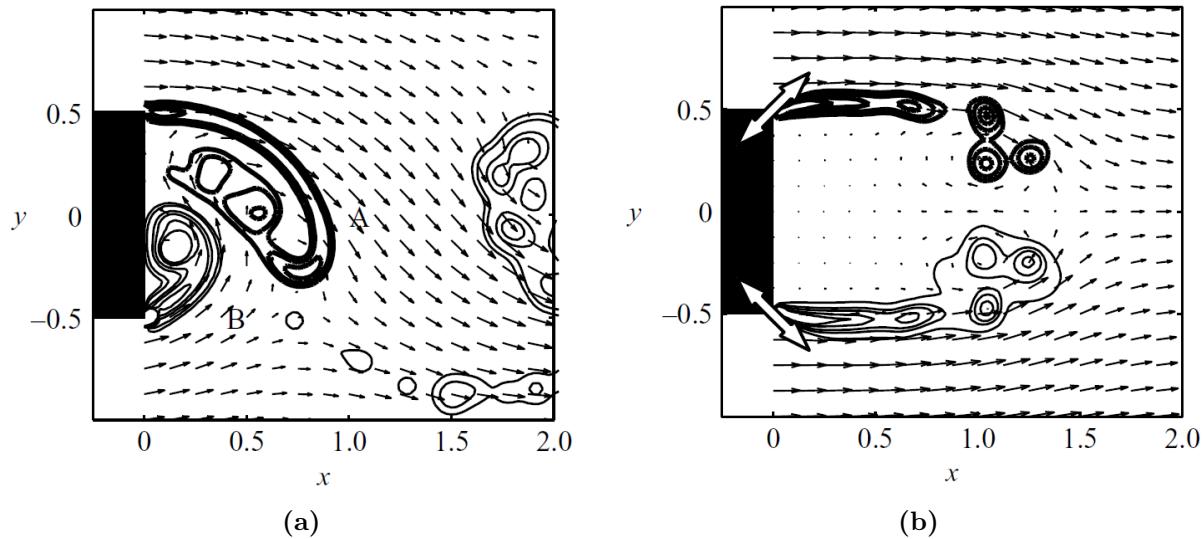
Während sich die passive Strömungskontrolle mit der Veränderung der Modellgeometrie beschäftigt, hat die aktive Strömungskontrolle den Vorteil, eine vorhandene Geometrie nicht oder nur geringfügig verändern zu müssen beziehungsweise unabhängiger von dieser zu sein. Außerdem ist diese adaptiv für verschiedene Umgebungsbedingungen. Allerdings sind auch Nachteile vorhanden. So wird für ein solches System immer eine antreibende Energie benötigt. Zusätzlich sind solche System sehr komplex, wodurch sie teurer und störungsanfälliger sind. Beispiele für verschiedene Methoden zur aktiven Strömungskontrolle und dessen Aktuatoren sind in der Arbeit von *Cattafesta und Sheplak* [3] gegeben. So kann über Fluide, sich bewegende Flächen beziehungsweise Objekte und über Plasma aktuiert werden. Die Aktuierung mit Fluiden kann dabei ohne oder mit vorhandenem Massenstrom realisiert werden. So sind Lautsprecher, die periodisch eine Geschwindigkeit induzieren, massenstromlos, während Ausblasung oder Absaugung einen Massenstrom besitzen. Beispiele für sich bewegende Flächen sind ein vibrierendes Band oder Klappe, oszillierende Drähte und sich drehende Oberflächen. Die Aktuierung per Plasma kann über Koronaentladung, stille elektrische Entladung oder Funkenstrahler realisiert werden. Einige relevante Forschungsergebnisse bezüglich Stumpfkörpern und aktiver Strömungskontrolle sollen im folgenden Abschnitt vorgestellt werden.

Die Coanda Ausblasung ist eine Art der aktiven Strömungskontrolle per Fluid. Dabei wird ein Luftstrahl tangential über eine konvexe Fläche geblasen, womit der Grenzschicht fehlende kinetische Energie hinzugefügt wird, die benötigt wird, um die Strömung an Stellen mit ungünstigem Druckgradienten weiter an der Oberfläche entlang zu führen. Es ergibt sich ein Geschwindigkeitsprofil, in dem die Geschwindigkeiten in Wandnähe sehr viel höher sind als bei unaktuierter Strömung. Somit ist es möglich, den Ablösepunkt in ganz unterschiedlichen Anwendungsgebieten zu beeinflussen. So haben *Freund und Mungal* [5] sich den Coanda Effekt zu Nutze gemacht, um den Widerstand eines achsensymmetrischen Stumpfkörpers zu reduzieren. Die Basis des Körpers wurde mit wechselbaren Platten ausgestattet, wodurch es möglich war, unterschiedliche Ausblasungsgeometrien zu testen. Versorgt wurde die Ausblasung von außerhalb des genutzten Windkanals per regulierter Druckluft, wodurch Ausblasungsgeschwindigkeiten zwischen 0 und 150 m/s möglich waren. Die besten Ergebnisse gelangen bei einer Anströmgeschwindigkeit von  $V_\infty = 50 \text{ m/s}$  und einer Ausblasungsgeschwindigkeit von  $V_{jet} = 2 \cdot V_\infty$ . Hier gelang es, den Basisdruck deutlich zu senken und den Widerstand um 30% zu reduzieren. Freund und Mungal war es sogar möglich, durch sehr hohe Ausblasungsgeschwindigkeiten einen negativen Widerstand, also Schub, zu erzeugen.

Einen weiteren, nah an der Praxis angelehnten, Versuch machten *Geropp und Odenthal* [6]. Diese testeten ein 1:5 Automodell mit Coanda Ausblasung am Heck auf die Möglichkeit, damit den Widerstand zu reduzieren. In dem genutzten Windkanal wurde ein sich bewegender Gürtel am Boden der Teststrecke angebracht, der die relative Bewegung zwischen Automobil und Straße korrekt abbilden soll. Der über zwei Walzen laufende Gürtel besaß dabei immer die gleiche Geschwindigkeit der Anströmung. Durch den Coanda Effekt gelang es, die Totwasserregion komplett verschwinden zu lassen und den Druck an der Basis zu reduzieren. Die besten Ergebnisse mit einer Basisdruckerhöhung von 50% und einer Widerstandsreduzierung von 10% konnten bei  $V_{jet}/V_\infty = 2$  erzielt werden.

Eine andere Art der Aktuierung wurde von *Pastoor u. a.* [15] genutzt, um bei einem D-förmigen Stumpfkörper den Widerstand zu reduzieren. Anderes als bei der Coanda Ausblasung wurden hier Lautsprecher genutzt. Durch diese ist es möglich, sinusförmig eine massenstromlose Geschwindigkeit zu induzieren. Die Lautsprecher befanden sich symmetrisch in den beiden Hinterkanten des Modells. Bei den Untersuchungen, die bei  $Re = 23000$  bis 70000 stattfanden, wurden sowohl Amplitude als auch Frequenz variiert. Außerdem wurde auf der Ober- und Unterseite sowohl synchron aktuiert, als auch um 180 Grad Phasen versetzt. Die Ergebnisse der open-loop Untersuchungen zeigen eine Widerstandsreduzierung von 15% bei einer Basisdruckerhöhung von 40%. Dies wurde mit synchroner Aktuierung bei  $C_\mu = 0,009$  und  $St = 0,15$  erreicht. In Abbildung 1.3 ist zu sehen, wie die Aktuation das Totwassergebiet langzieht und die Bildung der Wirbelstraße hinauszögert.

Ebenfalls fand man heraus, dass eine Aktuierung mit  $St = 0,23$  oder höher den Widerstand über den der Referenz bringt.  $St = 0,23$  ist die natürliche Abscheidefrequenz der Wirbel des Stumpfkörpers ohne Aktuierung. Pastoor wies diesen Effekt einer Verstärkung der Wirbelinstabilität zu.



**Abbildung 1.3.:** Strömungsvisualisierung für die natürliche Strömung (a) ohne Aktuierung und (b) mit Aktuierung bei  $C_\mu = 0,009$  und  $St = 0,15$  [15]

## 1.4. Strömungskontrolle durch sich bewegende Fläche

Ein anderes Konzept der aktiven Strömungskontrolle ist mit sogenannter Moving Surface Boundary-Layer Control (MSBC) gegeben. Durch sich bewegende Flächen, die in der Strömung liegen, sollen positive Effekte hervorgerufen werden. Zum einen wird die Relativgeschwindigkeit zwischen Strömung und Oberfläche reduziert, wodurch das Wachstum der Grenzschicht verzögert werden kann und zum anderen induziert diese Oberfläche einen Impuls in die Strömung.

Modi [13] nutzte dies, um durch rotierende Zylinder den Auftrieb eines Flügels zu erhöhen. Hierzu platzierte er an verschiedene Stellen der Tragfläche, wie zum Beispiel der Vorderkante, eine oder mehrere Zylinder, die mit bis zu  $8000\text{min}^{-1}$  drehten. Ebenfalls untersuchte Modi drei Arten von Stumpfkörpern mit solchen Walzen auf die Möglichkeit, mit diesen den Widerstand zu reduzieren. Es gelang eine Reduzierung von 75% bei einer ebenen Platte, die senkrecht in der Strömung lag und oben und unten einen Zylinder verbaut hatte. Hierbei lag die Umfangsgeschwindigkeit der Walzen bei dem dreifachen der Geschwindigkeit der freien Anströmung. Als zweiten Körper wurde ein rechteckiges

Prisma untersucht, in dem in zwei der vier Kanten Zylinder untergebracht wurden. Untersucht wurde dieses in drei verschiedenen Einbaulagen, zu sehen in 1.4. Der Fall (b) mit den Walzen auf der Oberseite des Modells, brachte mit 53% Widerstandsreduzierung das beste Ergebnis. Zeigten die Walzen der Strömung entgegen (a) gelang immerhin noch eine Reduzierung um 40%. Dagegen konnte die Variante mit den Walzen auf der Hinterseite (c) nur einen Gewinn von gerade mal 13% mit sich bringen. Der dritte untersuchte Körper war ein D-förmiges Profil, das mit der stumpfen Seite der Strömung entgegen gerichtet war und jeweils eine Walze in den Vorderkanten hatte. Auch hier gelang es, erfolgreich den Widerstand um 42% zu reduzieren. In Abbildung 1.5 sind die Effekte der Walzen durch Strömungsvisualisierung für das D-Profil aufzeigt. Es ist gut zu sehen, wie sich bei  $V_{Zylinder}/V_\infty = 4$  keine Wirbel mehr abscheiden.

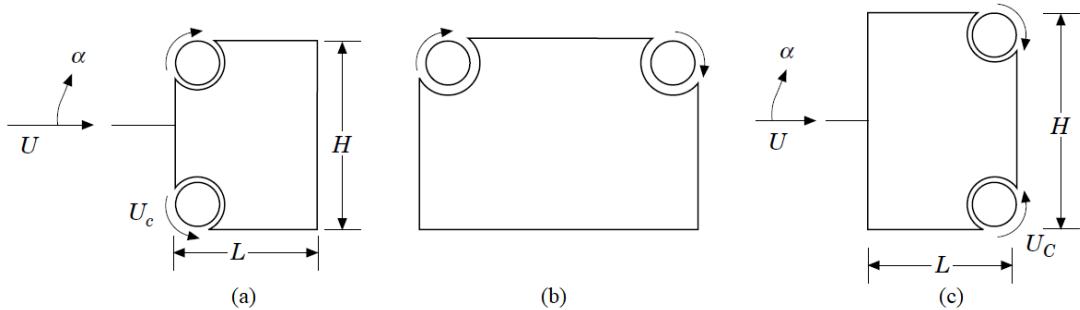


Abbildung 1.4.: Von *Modi* [13] untersuchtes Prisma in den verschiedenen Einbaulagen

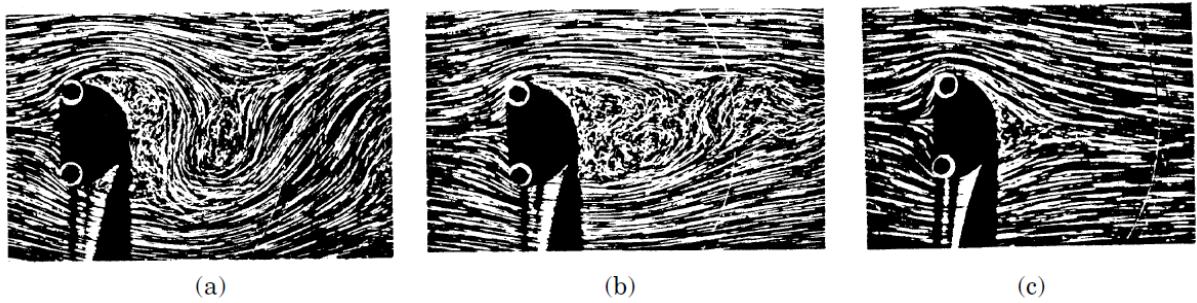
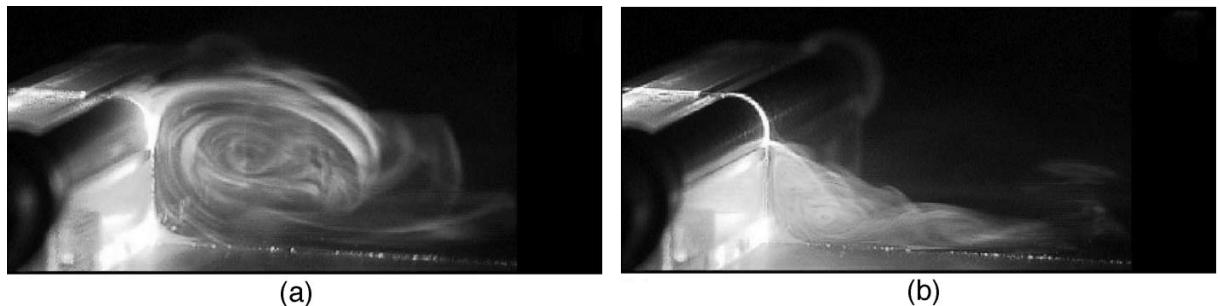


Abbildung 1.5.: Strömungsvisualisierung des von *Modi* [13] untersuchten D-Körpers mit (a)  $V_{Zylinder}/V_\infty = 0$ , (b)  $V_{Zylinder}/V_\infty = 2$ , (c)  $V_{Zylinder}/V_\infty = 4$

Ebenfalls untersuchte *Beaudoin u. a.* [1] das Potential von Walzen in einem halbierten D-förmigen Stumpfkörper zur Widerstandsreduzierung. Auch hier wurde ein Zylinder in der Kante untergebracht, jedoch zeigt die abgerundete Seite in diesem Fall entgegen der Strömung. Die  $r = 5 \text{ mm}$  große Walze erreicht eine Kreisfrequenz von bis zu  $\Omega/2\pi = 250 \text{ Hz}$ , was  $V_{Zylinder} = 7,5 \text{ m/s}$  entspricht. Die Resultate bei einer Reynolds-Zahl zwischen 3000 und 20000 ergaben bei der open-loop Kontrolle eine Widerstandsreduzierung von 23% bei  $V_\infty = 6 \text{ m/s}$  und 11% bei  $V_\infty = 6 \text{ m/s}$ . Ebenfalls hat Beaudoin Rauch zwischen Modell

und Zylinder injiziert, um die Effekte der aktiven Strömungskontrolle zu visualisieren (siehe Abbildung 1.6). Der Zylinder verzögert deutlich die Ablösung, was zu einem kleineren Totwassergebiet führt.



**Abbildung 1.6.:** Strömungsvisualisierung des D-förmigen Stumpfkörpers von *Beaudoin u. a. [1]* bei (a)  $V_{Zylinder}/V_\infty = 0$  und (b)  $V_{Zylinder}/V_\infty = 2$

In den letzten beiden Abschnitten wurden unterschiedliche Aktuierungsmethoden mittels Fluid oder sich bewegenden Flächen vorstellt. Während Ausblasungen die Möglichkeit besitzen, die Strömung sehr stark zu beeinflussen, besitzen sie jedoch auch einen großen Nachteil. Sie benötigen sehr viel Energie und sind somit teuer in Bezug auf ihren Betrieb. Im Gegensatz dazu sind die Kosten zum Betreiben eines Motors, der eine Walze zur Strömungsbeeinflussung dreht, nur ein Bruchteil davon. Ziel dieser Arbeit ist es, diese Aktuierungsmethoden miteinander zu verbinden, um einen Synergieeffekt zu erzeugen, der die Vorteil kombiniert. Durch die wird erhofft, dass diese sich gegenseitig positiv beeinflussen und somit als Einheit besser funktionieren als getrennt voneinander, wodurch die Betriebskosten reduziert werden.

Die folgende Arbeit ist so aufgebaut, dass zunächst die genutzte Ausrüstung, wie der Windkanal, das Modell und die verwendeten Messtechniken vorstellt werden. Im Anschluss erfolgt die Auswertung der Messungen. Diese ist in Referenzmessungen, konstante Aktuierung und periodische Aktuierung aufgeteilt. Zum Schluss folgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse.

## 2. Experimenteller Aufbau

### 2.1. Windkanal

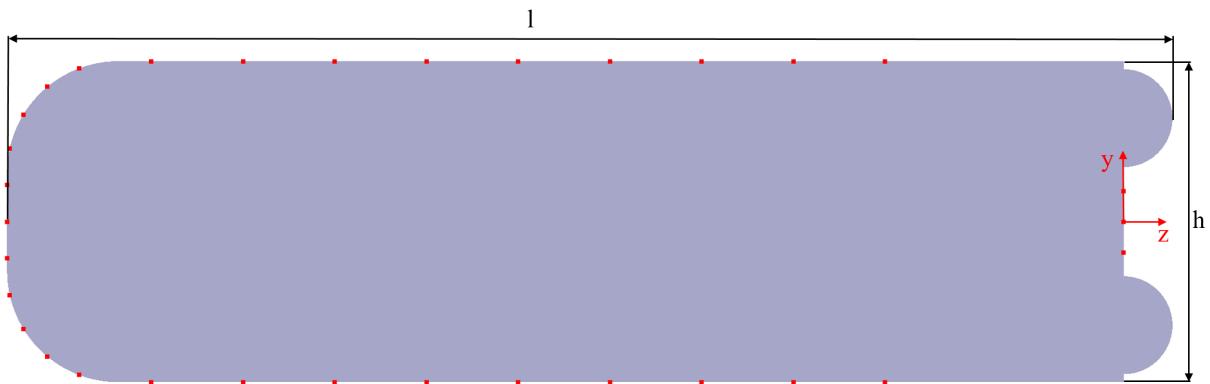
Die Untersuchungen finden mit Hilfe des LNB (Leiser Niedergeschwindigkeitskanal Braunschweig) statt, der sich am Institut für Strömungsmechanik der TU Braunschweig befindet und in Abbildung 2.1 dargestellt ist. Der Windkanal ist nach Eiffel Bauart und besitzt eine geschlossene Messstrecke, die  $400\text{ mm}$  breit,  $600\text{ mm}$  hoch und  $1500\text{ mm}$  lang ist. Der Kanal selbst ist insgesamt  $6250\text{ mm}$  lang und an der Düse  $2695\text{ mm}$  hoch. Die Rückführung der Luft erfolgt über den Umgebungsraum selbst. Die Düse ist vom Burger Typ und hat Kontraktionsverhältnis von 16:1. Um Geräuschreflektionen zu verringern, ist die Außenseite der Düse und die Innenseite des Diffusors mit Akustikschwam ausgekleidet. Zur Turbulenzreduzierung durchläuft die eingehende Luft eine  $30\text{ mm}$  dicke Fleecematte, eine  $133\text{ mm}$  Bienenwabenstruktur und ein fein gewobenes Sieb. Durch diese Maßnahmen ist es möglich, den Turbulenzgrad bei  $10\text{ m/s}$  unter  $0,1\%$  zu bringen. Die maximale Strömungsgeschwindigkeit des LNB beträgt  $20\text{ m/s}$ .



Abbildung 2.1.: Leiser Niedergeschwindigkeitskanal Braunschweig (LNB)

## 2.2. Modell

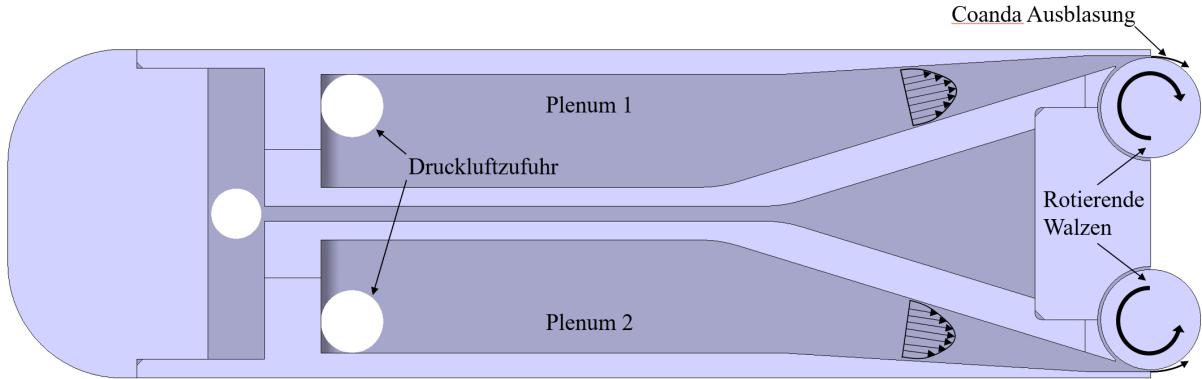
Die Grundform des Modells ist der Arbeit von *Oswald* [14] entnommen und entspricht einem runterskalierten Modell von *Pastoor u. a.* [15]. Jedoch wurden die Aktuierungsmechanismen komplett überarbeitet, wodurch sich aufgrund der hinzugefügten Walzen in den Hinterkanten eine veränderte Basiskonfiguration ergibt. Das D-förmige Stumpfkörper-Modell besitzt eine Höhe  $h$  von 53,4 mm, eine Breite  $b$  von 390 mm und eine Länge  $l$  von 190,6 mm. Ausgestattet ist das Modell mit 32 Druckmessbohrungen, die im Mittelschnitt angeordnet sind und über Schläuche an ein Druckmesssystem angeschlossen sind. Die Anordnung dieser Bohrungen und die Geometrie des Modells sind in Bild 2.2 zu sehen.



**Abbildung 2.2.:** Modellgeometrie des D-förmigen Stumpfkörpers und die Anordnung der vorhandenen Druckmessbohrungen

Die Aktuierungsmechanismen, also Ausblasung und die sich drehenden Walzen/Zylinder befinden in den Hinterkanten der Basis (siehe Abbildung 2.3). Die Walzen sind über Rollenkugellager, die in vertikal verschiebbaren Lagerböcken sitzen, gelagert. Zusammen mit beiden unabhängigen Platten formen die Walzen den Ausblasungsspalt für die Ausblasung. Die Wellen dienen dabei zusätzlich als konvexe Flächen, die für den Coanda Effekt genutzt werden.

Die Welle besitzt eine Gesamtlänge von 430,8 mm wobei der aktuierende Teil sich über 348 mm erstreckt und somit 88% der Modellspannweite abgedeckt. Der aktuierende Walzendurchmesser beträgt 16 mm. Jeweils auf einer Seite wird ein Wellenabsatz, durch die Scheibe der Messstrecke nach außen geführt, um dort über eine R+W Sicherheitskupplung mit einem Gleichstrommotor gekoppelt zu werden (siehe Abbildung 2.4). Um einen Druckverlust in der Messstrecke zu vermeiden, wird das entstandene Loch über eine Bürstendichtung abgedichtet. Die Motoren werden über zwei 10-Gang Potentiometer



**Abbildung 2.3.:** Aktuierungsmechanismus des Stumpfenkörpermodells; Luft wird aus dem Plenum über die sich drehenden Walzen ausgeblasen

gesteuert. Die Drehzahl wird, über die im Motor eingebauten Drehzahlgeber als Analogsignal ausgegeben und per NI-6210 USB Karte ausgelesen. Die Datenblätter der Motoren, der Kupplungen und der Datenerfassungskarte sind in Anhang A.2. zu finden.

Durch Fertigungstoleranzen hängen sowohl die obere als auch die untere Welle um  $0,04\text{ mm}$  durch. Dies führt beim Rotieren zu einer leicht periodischen Größenänderungen der Spalts. Dies muss sowohl bei der Einstellung des Spalts als auch beim späteren Messen berücksichtigt werden.

Die Ausblasung erfolgt über zwei Pläne, die von Außerhalb des Kanals über vier Schläuche mit Druckluft versorgt werden. Die Druckluft wird von einem  $8\text{ bar}$  Kompressor erzeugt, der das gesamte ISM Institutsgebäude versorgt. Um Schwankungen auszugleichen, wird zwischen den Plänen und der Druckluftanlage ein  $50\text{ l}$  Drucklufttank montiert. In Abbildung 2.3 ist der Mittelschnitt des Plenums zu sehen. Das Plenum ist groß ausgelegt, um eine Gleichförmigkeit der Strömung zu gewährleisten und besitzt ein Kontraktionsverhältnis von  $1 : 60$ . Der Ausblasungsspalt wird durch die Welle und der Plenumsoberseite geformt und besitzt eine Länge von  $334\text{ mm}$ , was  $86\%$  der Spannweite entspricht. Die Spalthöhe lässt sich über die verstellbaren Lagerböcke der Walzen, als auch über acht Schrauben einstellen, die auf der Ober- und Unterseite des Modells liegen und den Spalt an diesen Stellen zusammendrücken beziehungsweise öffnen können. Ziel ist eine Spalthöhe von  $0,3\text{ mm}$ .

Um eine spannweitige Gleichförmigkeit der Ausblasung zu gewährleisten, wurde der Spalt vor dem Einbau in den LNB per Fischmaulsonde vermessen und einstellt. Hierzu wurde der Druck entlang der Ausblasung gemessen und der Spalt währenddessen durch die Einstellschrauben geöffnet beziehungsweise geschlossen bis eine möglichst genaue Gleichförmigkeit vorherrschte. Aufgrund der Wellenunförmigkeit findet die Einstellung bei mitlaufenden Walzen bei  $500\text{ min}^{-1}$  statt, um den durchschnittlichen Druck bei kombinierter



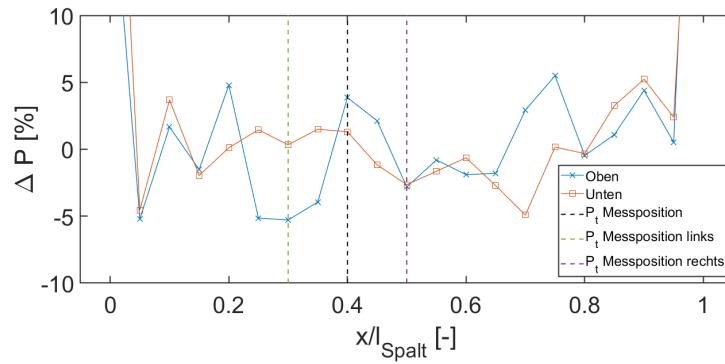
**Abbildung 2.4.:** Nach außen geführter Wellenabsatz wird über eine Sicherheitskupplung mit dem Gleichstrommotor verbunden; Abgedichtet per Bürstendichtung

Aktuierung einzustellen. Dabei wurde regelmäßig mit Fühlerlehrnen kontrolliert, dass die Zielpalthöhe noch immer vorhanden ist. Außerdem fand ein dauerhafter Vergleich der beiden Plenumsinnendrücke statt, um zu gewährleisten, dass die Spalte identisch ausblasen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2.5 dargestellt. Die Abbildung zeigt die Abweichung vom mittleren Druck der Ausblasung in Prozent über die Spaltposition. In dem für die Messungen relevanten Bereich ist eine maximale Abweichung von 6% vom Durchschnittsdruck des jeweiligen Spalts zu sehen. Lediglich die ersten und letzten 5% der Ausblasung weisen eine deutlich höhere Abweichung aus, was durch die Seitenwandeffekte der Plenen nicht vermieden werden kann. Die Auswirkungen dieser Abweichungen auf den Mittelschnitt, in dem die letztendlichen Messungen stattfinden, ist vernachlässigbar klein. Es sei zu erwähnen, dass die Drücke bei 0% und 100% der Spaltlänge nicht mit in die Mittelwertberechnung eingegangen sind.

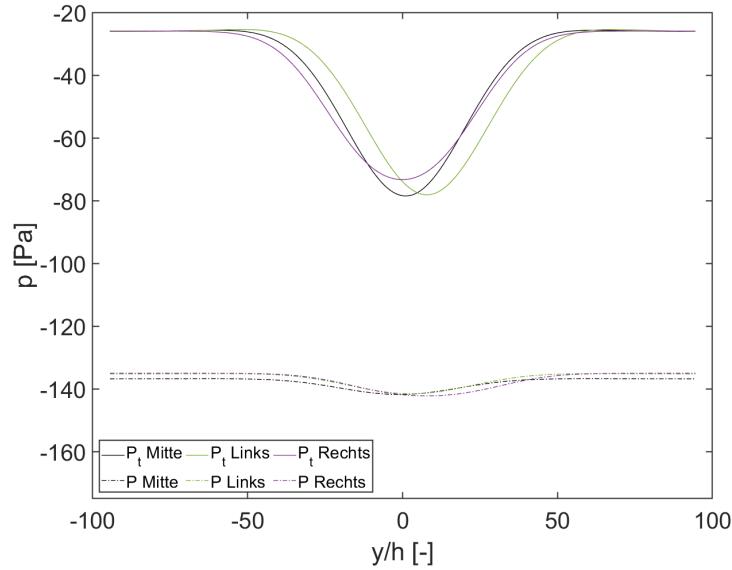
In Abbildung 2.6 ist die Druckverteilung für drei verschiedene Rächenpositionen bei kombinierter Aktuierung dargestellt - exakt mittig, 30 mm nach links und 30 mm nach rechts in horizontaler Richtung verschoben. Es ist im Verlauf der linksseitig aufgenommenen Daten zu sehen, dass die Spitze des Totaldruckverlaufs nach oben wandert. Um diesen Effekt zu erklären sind in Abbildung 2.5 die Positionen der Pitot Rohrer für die jeweiligen Messungen als Linie eingezeichnet. Die linksseitigen Messwerte (grün) zeigen im Vergleich zu der Referenz (schwarz) einen höheren Ausblasungsdruck im unteren Spalt, wodurch sich die Verschiebung der Druckspitze erklärt. Bezüglich der rechtsseitig aufgenommenen Werte (lila) ist ein grundsätzlich geringerer Ausblasungsdruck im Vergleich zur Referenz zu sehen, was die Abflachung erklärt. Allgemein ist hier zu sehen, wie empfindlich der

Nachlauf von nur kleinen Druckunterschieden beeinflusst wird.

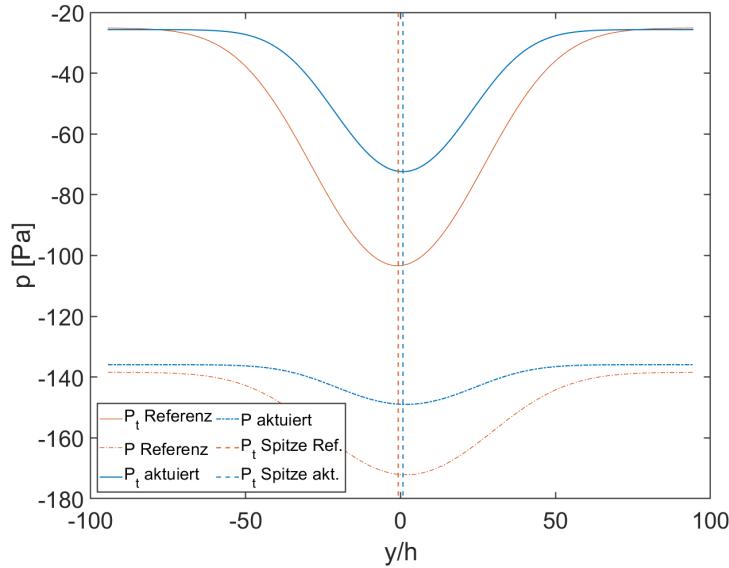
Abgesehen von der horizontalen Spaltgleichmäßigkeit wurde überprüft, ob die obere und die untere Ausblasung identisch sind. Hierzu wurde im LNB eine Rächen-Messung ohne Aktuierung und eine mit kombinierter Aktuierung gemacht, um festzustellen, ob die Spitze des Druckverlaufs im Rächen wandert. Das Ergebnis ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Zu sehen ist eine Verschiebung der Druckspitze von  $\sim 1,5 \text{ mm}$ . Die ist ein äußerst akzeptabler Wert, womit bestätigt werden kann, dass der obere und untere Spalt quasi identisch sind und keine vertikal asymmetrische Aktuierung stattfindet.



**Abbildung 2.5.:** Abweichung des Ausblasungsdruckes vom Mittelwert in Spannweitenrichtung



**Abbildung 2.6.:** Druckverlauf im Rächen in mittiger Position, 30 mm nach links verschoben und 30 mm nach rechts geschoben; bei  $P_{Pl} = 20 \text{ kPa}$  und  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$



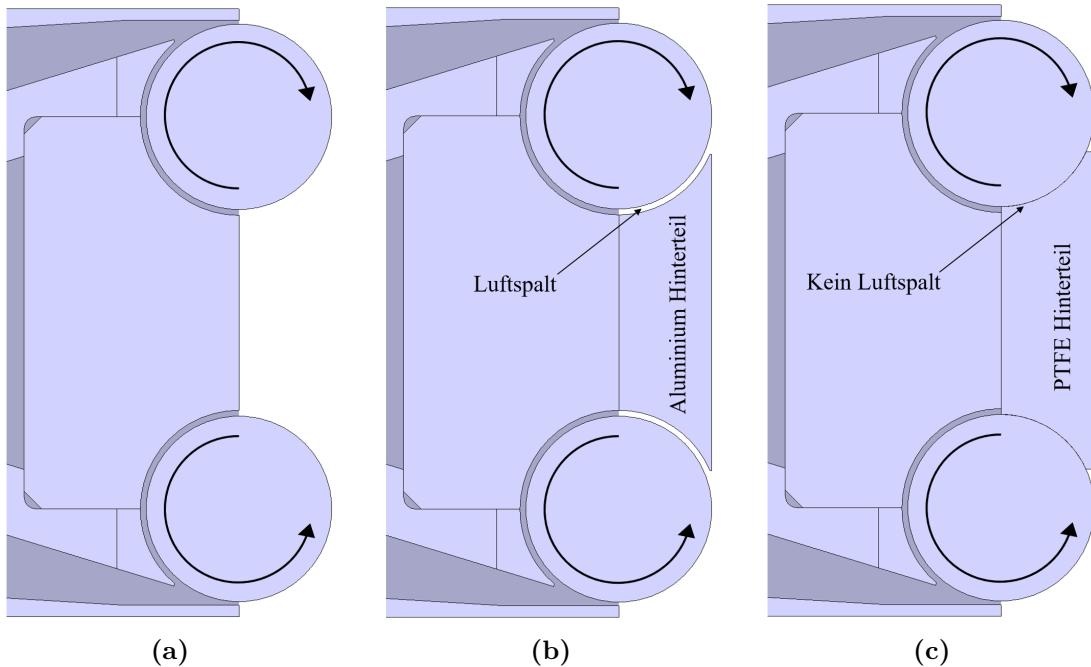
**Abbildung 2.7.:** Vergleich des Druckverlaufs ohne Aktuierung und mit Aktuierung bei  $10 \text{ kPa}$  und  $1500 \text{ min}^{-1}$

Abgesehen von der Basiskonfiguration werden noch drei weitere untersucht. Zwei dieser Konfigurationen umfassen die Veränderung der Basis und sind zusammen mit der Basiskonfiguration in Abbildung 2.8 dargestellt. Während sich bei der ersten Variante ein Spalt zwischen Welle und Walze von  $0,3 \text{ mm}$  ergibt, wird dieser Spalt bei der zweiten Variation geschlossen. Um die Walze nicht zu beschädigen, wird der Anbau aus PTFE (Polytetrafluorethylen) gefertigt. PTFE ist ein teilkristallines Polymer, welches sich sehr gut zur Trockenschmierung eignet. Diese drei Varianten sind in Abbildung 2.8 dargestellt und werden fortan Basiskonfiguration, Konfiguration 1 und Konfiguration 2 benannt.

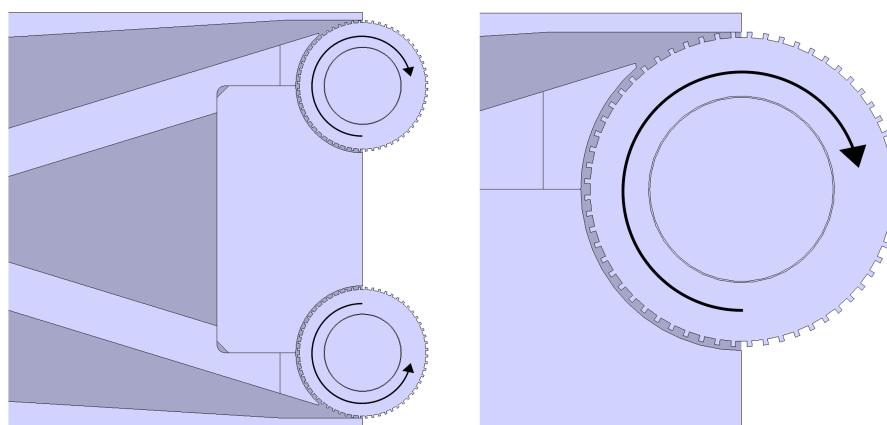
Vorangegangene Untersuchung zeigen, dass eine periodische Aktuierung deutlich effektiver ist als eine konstante. Aus diesem Grund soll durch die dritte Konfiguration eine periodische Ausblasung ermöglicht werden. Die glatten Wellen werden durch zwei Wellen mit PTFE-Mantel ersetzt, dessen Durchmesser um  $0,6 \text{ mm}$  größer sind und Nuten in Längsrichtung besitzen (siehe Abbildung 2.9). Durch die Nuten und den größeren Durchmesser kommt es dazu, dass je nach Rotationswinkel entweder ein Ausblasungsspalt vorhanden ist oder aber nicht. Bei bedrucktem Plenum wird somit immer, wenn der Spalt geöffnet ist, ausgeblasen. Über die Wellendrehzahl und der bekannten Nutenanordnung lässt sich so die Aktuierungsfrequenz steuern. Die eingebrachten Nuten sind  $0,3 \text{ mm}$  tief und  $0,6 \text{ mm}$  breit. Werden diese Nuten alle  $6$  Grad gefräst, erhält man auf den Umfang verteilt  $60$  Nuten. Dabei sind die Stege zwischen den Nuten  $0,2 \text{ mm}$ , wodurch sich ein Tastgrad von  $75\%$  ergibt. Die Frequenz, die mit dieser Welle und einer maximalen Wellendrehzahl  $n$  von  $2500 \text{ min}^{-1}$  erreicht wird, lässt sich berechnen mit:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{\phi}, \quad (2.1)$$

wobei  $\omega = 2\pi n$  und  $\phi$  dem Winkel in Radiant entspricht. Bei den gegebenen 6 Grad und der maximalen Drehzahl ergibt sich somit als maximal erreichbare Frequenz  $f = 45,7 \text{ Hz}$ .



**Abbildung 2.8.:** Unterschied der Konfigurationen; (a) Basiskonfiguration (b) Konfiguration 1: Aluminium Anbau mit Spalt zwischen Hinterkante und Welle und (c) Konfiguration 2: PTFE Anbau ohne Spalt zwischen Hinterkante und Welle



**Abbildung 2.9.:** Konfiguration mit gezahnter Welle; Rotation der Wellen öffnet und schließt den Ausblasungsspalt periodisch

## 2.3. Widerstandsbestimmung

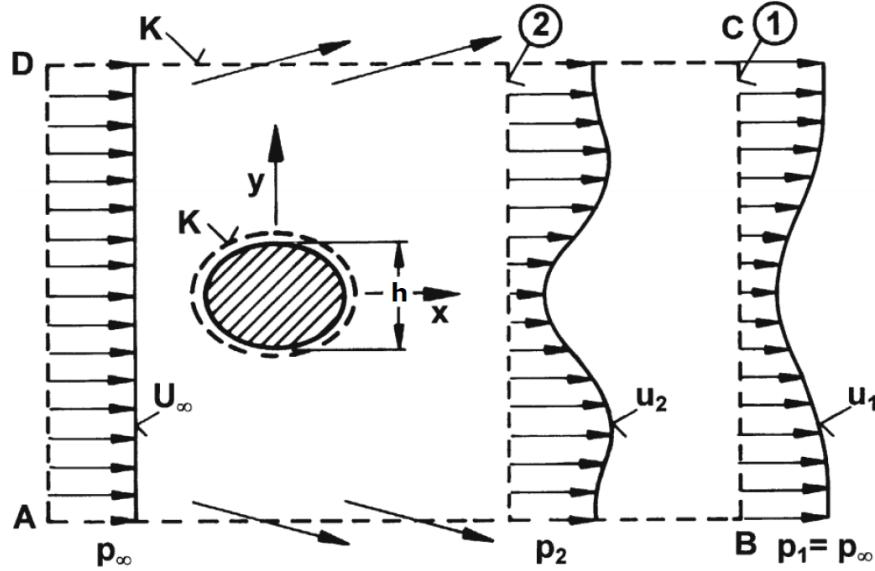
Üblicherweise werden zur Vergleichbarkeit normalisierte Größen genutzt, um Körper verschiedenster Formen und Größen in verschiedenen Strömungszuständen vergleichen zu können. So auch der Widerstandskoeffizient:

$$C_W = \frac{W}{\frac{\rho}{2} \cdot V_\infty^2 \cdot b \cdot h}. \quad (2.2)$$

In dieser Gleichung entspricht  $W$  der Widerstandskraft, die sich bei nicht auftriebs erzeugenden Körpern in Unterschall hauptsächlich aus Reibungswiderstand und Druckwiderstand zusammensetzt. Der Reibungswiderstand wird durch Reibung zwischen Fluid und Oberfläche des Körpers erzeugt, während der Druckwiderstand durch die ungleichmäßige Druckverteilung über den gesamten Körper entsteht. Die restlichen Größen der Gleichung entsprechen der Luftdichte des Fluids  $\rho$ , der Anströmgeschwindigkeit  $V_\infty$  sowie der Körperbreite  $b$  und der Körperhöhe  $h$  aus Abschnitt 2.2.

Diese Widerstandskraft, die auf einen Körper wirkt, kann auf unterschiedliche Art und Weisen gemessen werden. Zum Beispiel mit Hilfe einer direkten Messung durch eine Waage oder aber durch Messung der Druckverteilung im Nachlauf des Körpers. Zweiteres wird in den präsentierten Untersuchungen genutzt.

Der Grundsatz hinter dieser Messmethode ist die Tatsache, dass die zwischen Modell und Fluid vorhandenen Widerstandskräfte einen Impulsverlust zur Folge haben. Dieser ist in dem Abwindfeld des Körpers als Defizit in der Geschwindigkeitsverteilung zu sehen. Diese Geschwindigkeitsverteilung kann auch als Verteilung des totalen und des statischen Drucks ausgedrückt werden. In Abbildung 2.10 ist eine solche Verteilung vor, kurz und weit hinter einem statischen Körper aufgezeigt. Bevor die Strömung den Körper passiert, sind Geschwindigkeit  $V_\infty$ , Totaldruck  $p_{t,\infty}$  und statischer Druck  $p_\infty$  gleichmäßig verteilt. Passiert die Strömung den Körper (Bereich 2), ist der Verlust in der Geschwindigkeitsverteilung zu sehen. Daraus folgend sind auch Totaldruck und statischer nicht mehr gleichmäßig verteilt. Betrachtet man einen Punkt weiter stromab im Nachlauf (Bereich 1), ist ein geringerer aber dafür breiterer Verlust der Geschwindigkeit und des Totaldrucks zu sehen, jedoch ist die statische Druckverteilung wieder gleichmäßig.



**Abbildung 2.10.:** Geschwindigkeitsverteilung im Nachlauf eines, in freier Strömung liegenden Körpers [14]

Zum Aufstellen einer Impulsbilanz muss ein Kontrollvolumen festgelegt werden. Am besten geeignet ist dieses indem man es zwischen den Punkt A, B, C und D aus Abbildung 2.10 aufspannt. Hierdurch ist die Gleichung, die in x-Richtung aufgesetzt wird, unabhängig von den Volumen- und Flächenkräften zwischen den freiliegenden Flächen. Da, wie bereits erwähnt, der statische Druck an den Stellen AD und BC gleich ist, ist die Summe aller Kräfte in dem Kontrollvolumen gleich Null. Somit ist die einzige zu betrachtende Kraft die, die zwischen Kontrollvolumen und Körper entsteht. Diese Kraft entspricht der gesuchten Widerstandskraft  $W$  und ist gleich der Impulsveränderung zwischen den Ebenen AD und BC. Der Impulsfluss, der in das Volumen durch diese Ebenen eintritt bzw. es wieder verlässt ist:

$$I_{ein} = -\rho \cdot w \int v_\infty^2 dy, \quad (2.3)$$

$$I_{aus} = -\rho \cdot w \int v_1^2(y) dy + \rho \cdot w \int v_\infty [v_\infty - v_1(y)] dy. \quad (2.4)$$

Somit ergibt sich die Bilanz zu:

$$I_{ein} + I_{aus} = -\rho \cdot w \int v_1(y) [v_\infty - v_1(y)] = W. \quad (2.5)$$

Nach einigen Umformung lässt sich diese Bilanz zu  $C_W$  umformen:

$$C_W = \frac{W}{\frac{\rho}{2} \cdot V_\infty^2 \cdot b \cdot h} = 2 \int \frac{v_1(y)}{u_\infty} \left[ 1 - \frac{v_1(y)}{v_\infty} \right] d\left(\frac{y}{h}\right). \quad (2.6)$$

Mit Hilfe der Bernoulli Gleichung kann dies auch wie folgt ausgedrückt werden:

$$C_W = 2 \int \sqrt{\frac{q_1(y)}{q_\infty}} \left[ 1 - \frac{q_1(y)}{q_\infty} \right] d\left(\frac{y}{h}\right). \quad (2.7)$$

Hiermit ist eine Gleichung für den Widerstandskoeffizienten hergeleitet, die einzig allein von dem dynamischen Druckverlauf  $q_1(y)$  der Auslassebene abhängig ist. Leider ist es in den meisten Experimenten aufgrund der Messtechnik nicht möglich, die Druckverteilung in einem Bereich hinter dem Modell zu messen, in dem der statische Druckverlauf dem der gleichmäßigen Anströmung entspricht. Folglich sieht die messbare Druckverteilung wie in Bereich 2 aus. Umgangen werden kann dies durch die Methode von Jones die in der Arbeit von *Houghton und Carpenter* [9] beschrieben wird. Hier wird mit Hilfe der Bernoulli- und der Kontinuitätsgleichung die theoretische Druckverteilung im Bereich 1 durch die messbare Druckverteilung im Bereich 2 ausgedrückt:

$$C_W = 2 \int \sqrt{\frac{p_{t,2}(y) - p_2(y)}{q_\infty}} \left[ 1 - \sqrt{\frac{p_{t,2}(y) - p_\infty}{p_\infty}} \right] d\left(\frac{y}{h}\right), \quad (2.8)$$

dabei sind  $p_{t,2}$  und  $p_2$  der Totaldruck und der statische Druck in Ebene 2 aus Abbildung 2.10. Messbar sind der Totaldruck- und statische Druckverlauf durch einen mit Pitot und Prandtl Sonden ausgerüsteten Druckmessrädchen, der im Nachlauf des Modells angebracht ist. Wichtig ist, dass er Rädchen weit genug vom Modell entfernt platziert ist, um den Strömungswinkel zwischen Strömung und Sonden möglichst gering zu halten. Zusätzlich muss der Rädchen die gesamten Nachlaufdelle abdecken.

Da der statische Druck  $p_\infty$  und der dynamische Druck  $q_\infty$  der freien Anströmung nicht direkt gemessen werden, sollten diese als Größen ausgedrückt werden, die vom Rädchen gemessen werden können. Aus diesem Grund empfiehlt *Hofmacher* [8] folgenden Ausdruck:

$$p_\infty = p_{t,\text{außerhalb}} - q_\infty, \quad (2.9)$$

wobei  $p_{t,\text{außerhalb}}$  dem Totaldruck außerhalb der Nachlaufdelle entspricht. Durch Einsetzen dieses Terms ist sichergestellt, dass das Integral in Gleichung 2.8 außerhalb der Delle zu Null wird. Zusätzlich dazu kann  $q_\infty$  laut *Houghton und Carpenter* [9] wie folgt ausgedrückt werden:

$$q_\infty = p_{t,\text{außerhalb}} - p_{\text{außerhalb}}. \quad (2.10)$$

Diese beiden Substitutionen ergeben sich aus der Näherung, dass der Totaldruck und statische Druck außerhalb der Nachlaufdelle im Bereich 2 annähernd den Drücken der freien Anströmung entsprechen. Fehler, die durch eine solche Approximation entstehen, sind klein und werden toleriert. Nach Einsetzen von 2.9 und 2.10 in 2.8 ergibt sich somit:

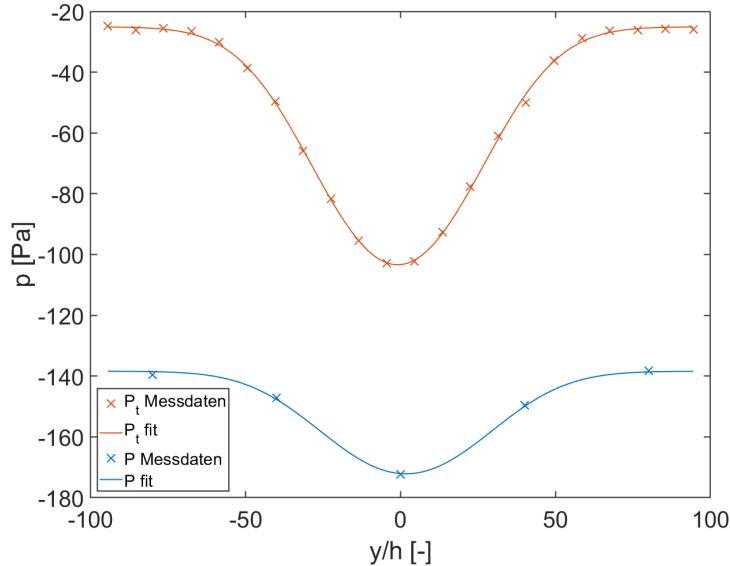
$$C_W = 2 \int \sqrt{\frac{p_{t,2}(y) - p_2(y)}{p_{t,\text{außerhalb}} - p_{\text{außerhalb}}}} \left[ 1 - \sqrt{\frac{p_{t,2}(y) - p_{\text{außerhalb}}}{p_{t,\text{außerhalb}} - p_{\text{außerhalb}}}} \right] d\left(\frac{y}{h}\right). \quad (2.11)$$

Mit Hilfe dieser Gleichung kann nun durch einen Messrachen  $C_W$  bestimmt werden. Dieser Rachen ist in Abbildung 2.11 dargestellt. Er besitzt 22 Pitot Rohre und 5 Prandtl Sonden, die in zwei voneinander getrennten Armen untergebracht sind, die einen Abstand von 64 mm besitzen. Die Pitot Rohre sind über 189 mm in gleichen Abständen von 9 mm verteilt, während die Prandtl Sonden in einem Abstand von 40 mm über 160 mm angeordnet sind. Der Rachen ist so in der Messstrecke positioniert, dass zwischen diesem und der Modellhinterkante 130 mm liegen. Da im Vergleich zu der Arbeit von *Oswald* [14] keine Regelung durchgeführt wird, wird der Rachen bei den meisten Messungen vertikal nach unten und nach oben verschoben, um mehr Messpunkte zu generieren und genauere Ergebnisse zu erhalten.



**Abbildung 2.11.:** Druckmessrachen zur Bestimmung von  $C_w$

Ein Beispiel für eine mit dem vorhandenen Rächen aufgenommene Druckverteilung ist in Abbildung 2.12 gegeben. Dabei ist auf der y-Achse der Druck aufgetragen und auf der x-Achse  $y/h$ . Der Matlab Code zur Erstellung dieses Plots und der Berechnung des Widerstands ist im Anhang A.1. zu finden.



**Abbildung 2.12.:** Beispiel Druckverteilung des Nachlaufrächens

## 2.4. Weitere Messtechnik

Hauptaugenmerk dieser Arbeit ist die Widerstandsbestimmung. Jedoch wurden zur Hilfe der späteren Auswertung weitere Instrumente genutzt, um bessere Aussagen treffen zu können. Da es nicht möglich war, Druckmessbohrungen im Ausblasungsspalt unterzubringen, wurde ein Luftmassenmesser genutzt, um so die Ausblasungsgeschwindigkeiten annähern zu können. Der Luftmassenmesser vom Typ 6442 der Firma testo nutzt einen Hitzdraht zum Messen und kann für Luftmassen von  $34 \text{ Nl/min}$  bis  $3750 \text{ Nl/min}$  genutzt werden. Er verfügt über eine Digitalanzeige und sendet zusätzlich ein Analogsignal welches über die genutzte Datenerfassungskarte ausgelesen werden kann. Mit Hilfe dieser Daten, lässt sich dann die Ausblasungsgeschwindigkeit  $V_{jet}$  wie folgt bestimmen:

$$V_{jet} = \frac{\dot{m}_{jet}}{\rho \cdot A_{jet}} = \frac{\dot{m}_{jet}}{\rho \cdot h_{jet} \cdot l_{jet}}, \quad (2.12)$$

wobei  $A_{jet}$  die Fläche des Ausblasungsspalts ist, die sich aus der Höhe  $h_{jet}$  und der Länge  $l_{jet}$  ergibt. Mit Hilfe dieser lässt sich der Momentumskoeffizient  $C_\mu$  bestimmen, der ein Maß für die Intensität der Ausblasung ist [18]:

$$C_\mu = \frac{\dot{m}_{jet} \cdot V_{jet}}{\frac{1}{2} \rho_\infty^2 \cdot V_\infty \cdot A_{ref}}. \quad (2.13)$$

Hier ist  $A_{ref}$  eine projizierte Referenzfläche. Im Fall von Stumpfkörpern ist es sinnig, diese bezüglich der Körperhöhe zu definieren.

Ein weiterer Parameter zur Beschreibung einer Ausblasung ist der Leistungskoeffizient. Dieser ist definiert als [10]:

$$C_{Power} = \frac{E_{jet}\dot{m}_{jet} + p_{jet}V_{jet}A_{jet} - (E_a\dot{m}_a + p_aV_aA_a)}{\frac{1}{2}\rho_\infty V_\infty^3 A_{ref}} \quad (2.14)$$

mit

$$E = c_v T + \frac{V^2}{2}. \quad (2.15)$$

Dabei entsprechen die Terme mit dem Indize  $a$  den Größen des Plenums, in dem noch keine Kontraktion der Strömung stattfindet.  $c_v$  ist die spezifische Wärmekapazität von Luft bei konstantem Volumen,  $T$  die Temperatur und  $V$  die Geschwindigkeit.

Abgesehen davon, wird mittels eines Leistungsmessgerät für die Steckdose, der Verbrauch der Gleichstrommotoren gemessen und notiert. Das Gerät zeigt den Verbrauch in 0,1 Watt Schritten auf einem Digitaldisplay an und ist von der Firma Voltcraft. Die Werte werden per Hand notiert. Mit Hilfe dieser Leistung lässt sich der Leistungskoeffizient ebenfalls für die Walzen definieren:

$$C_\mu = \frac{2 \cdot P_W}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^3 A_{ref}}, \quad (2.16)$$

wobei  $P_W$  die mit dem Leistungsmessgeräte abgelesen geforderte Leistung pro Walze ist.

## 2.5. Strömungsvisualisierung

Zur Visualisierung des Nachlaufs unter unterschiedlichen Aktuierungsintensitäten wird mit Hilfe einer Rauchlanze Rauch in den LNB geblasen. Die Lanze ist vom Typ NS3 der Firma Safex und mit einer 90 Grad Düse ausgestattet, die einen Innendurchmesser von 1 mm besitzt. Das verwendete Nebelfluid ist sehr dicht, aber schnell auflösend, um ein Vernebeln des Messraums zu vermeiden. Aufgrund der Baulänge der Nebellanz und der Raumhöhe des LNB, konnte die Nebellanz nicht in die Messstrecke eingelassen werden. Aus diesem Grund musste diese vor der Düse platziert werden, wodurch der Nebelfaden durch die Turbulenz vermindernden Maßnahmen des Kanals aufgefächert wurde.

Zum Dokumentieren dieser Rauchbilder wird als Kamera eine Canon D3200 mit einem AF-S Nikkor 18-55 mm Objektiv genutzt. Um mit möglichst kurzer Belichtungszeit aufzunehmen, wird ein LED Strahler unter den Kanal platziert, der die Messstrecke von unten beleuchtet. Für einen besseren Kontrast ist die Rückseite der Messstrecke mit schwarzem Fließ abgehängen.

# 3. Ergebnisse

## 3.1. Referenzmessungen

Zur Verifizierung der Widerstandsbestimmung über den Druckmessrächen wurden die Widerstandskoeffizienten für verschiedene Reynoldszahlen bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.1 dargestellt. Verglichen werden diese Werte mit den Arbeiten von *Pastoor u. a.* [15] und *Koida u. a.* [12]. Koida hat die Untersuchungen mit dem Modell von *Oswald* [14] fortgeführt. Die gemessenen Daten zeigen bei Erhöhung der Reynolds-Zahl eine Verringerung des Widerstands. Alle folgenden Untersuchungen dieser Arbeit finden bei einer Reynolds-Zahl von 50000 statt. Somit ist der Referenzwiderstand für die Basiskonfiguration  $C_W = 0,864$ . Die Druckverteilung im Nachlauf ist für diesen Fall in Abbildung 3.2 dargestellt. Außerdem ist in Abbildung 3.3 die Strömung durch Rauch sichtbar gemacht worden. Es ist deutlich zu sehen, wie sich abwechselnd Wirbel auf der Ober- und Unterseite abscheiden und sich eine Kármánsche Wirbelstraße bilden.

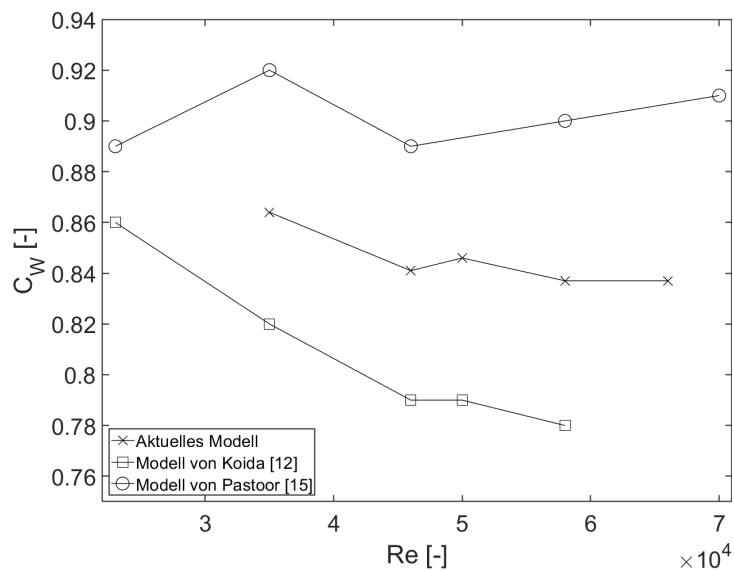
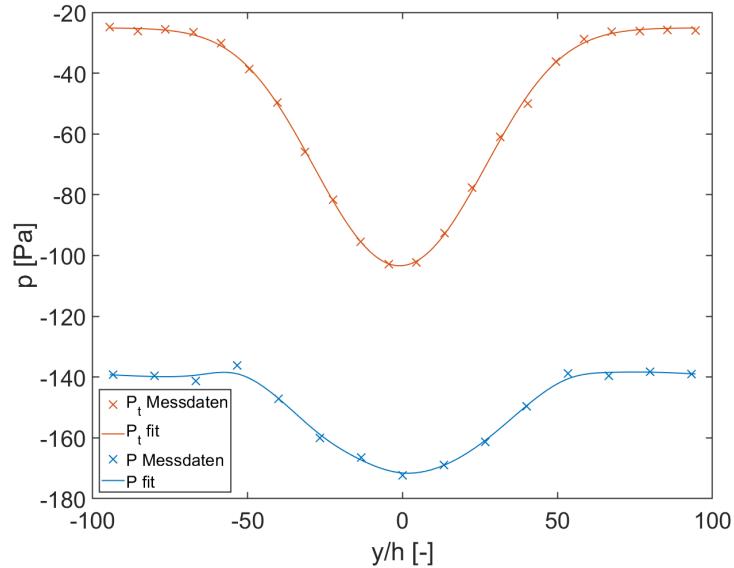


Abbildung 3.1.:  $C_W$ -Werte für die Basiskonfiguration im Vergleich mit *Pastoor u. a.* [15] und *Koida u. a.* [12] für  $Re = 35000$  bis  $Re = 66000$



**Abbildung 3.2.:** Druckverteilung im Nachlauf der Basiskonfiguration bei  $Re = 50000$



**Abbildung 3.3.:** Strömungsvisualisierung der Basiskonfiguration bei  $Re = 50000$

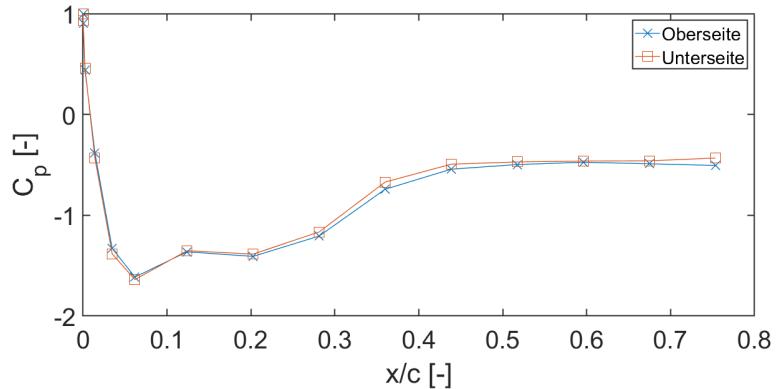
In den Abbildungen 3.4 und 3.5 sind die Druckverteilungen als Druckkoeffizient auf der Modelloberfläche für  $Re = 35000$  und  $Re = 66000$  dargestellt. Der Druckkoeffizient  $C_p$  ist definiert als:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2}. \quad (3.1)$$

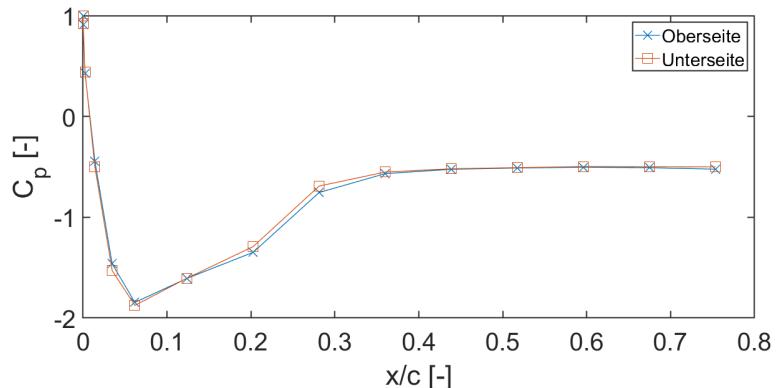
Aus konstruktiven Bedingungen war es nicht möglich, die Druckmessbohrungen weiter als  $x/c = 75\%$  unterzubringen. Es ist deutlich zu sehen, wie die Saugspitze an der Vorderkante des Stumpfkörper bei höherer Reynolds-Zahl ausgeprägter ist. Außerdem lässt

sich erkennen, dass die Werte der Ober- und Untersuchte sehr gut aufeinander liegen, womit bestätigt werden kann, dass das Modell symmetrisch eingebaut wurde. Auch zu sehen ist ein leichtes auseinander wandern der  $C_p$ -Werte in Richtung des Modellendes bei  $Re = 35000$ . Dieses Phänomen ist bei  $Re = 66000$  nur noch sehr schwach zu erkennen. Gründe hierfür können einseitige Unebenheiten und Fertigungstoleranzen sein, die bei geringen Reynolds-Zahlen eventuell in einem Bereich liegen, in dem die Grenzschichtströmung noch nicht zu turbulenter Strömung umgeschlagen ist und somit die viel anfälliger laminare Grenzschicht beeinflussen. Erhöht sich die Strömungsgeschwindigkeit liegen die Unebenheiten dann in einem Bereich, der von turbulenter Strömung dominiert wodurch Unebenheiten einen geringeren Einfluss haben. Jedoch sind die Abweichungen sehr gering und wahrscheinlich im Bereich der Messunsicherheiten, womit das Verhalten toleriert werden kann.

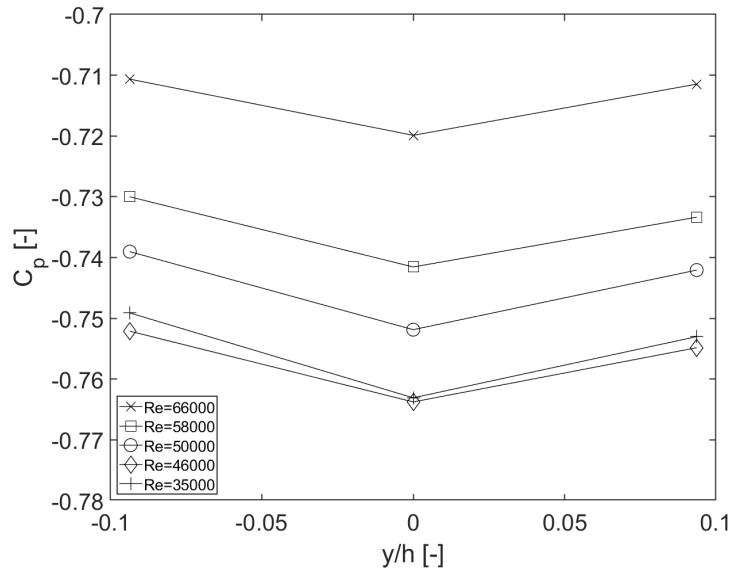
In Abbildung 3.6 ist die Druckverteilung an der Basis des Modells für verschiedene Reynolds-Zahlen zu sehen. Es ist wie erwartet mit steigender Reynolds-Zahl ein höherer Druck an der Basis zu sehen.



**Abbildung 3.4.:** Druckverteilung  $C_p$  für  $Re = 35000$  in Basiskonfiguration ohne Aktuierung



**Abbildung 3.5.:** Druckverteilung  $C_p$  für  $Re = 66000$  in Basiskonfiguration ohne Aktuierung



**Abbildung 3.6.:** Druckverteilung  $C_p$  auf der Basis für  $Re = 35000$  bis  $Re = 66000$  in Basiskonfiguration

Ebenfalls wurden die Referenzwiderstände für die zwei weiteren Konfigurationen gemessen. Diese sind, mit dem bereits erwähnten  $C_W$  der Basiskonfiguration in Tabelle 3.1 für  $Re = 50000$  aufgetragen. Die Basiskonfiguration besitzt somit den geringsten Widerstand, gefolgt von der Konfiguration 2. Die Konfiguration 1 besitzt den höchsten Widerstand.

**Tabelle 3.1.:** Referenzwiderstände für die drei Konfigurationen bei  $Re = 50000$

Konfiguration	$C_W$
Basiskonfiguration	0,846
Konfiguration 1	0,906
Konfiguration 2	0,860

## 3.2. Konstante Aktuierung

### 3.2.1. Reine Ausblasung

In den folgenden zwei Abschnitten sollen zunächst Ausblasung und rotierende Walzen getrennt voneinander untersucht werden. Im Fall der Aktuierung durch reine Ausblasung ist es aufgrund der Wellenunförmigkeit möglich, dass der obere und untere Ausblasungsspalt

verschiedene Höhen aufweist, wenn die Walzen nicht rotieren. Um trotzdem das bestmögliche Ergebnis für eine reine Aktuierung per Ausblasung zu erhalten, wird zunächst eine kombinierte Aktuierung eingestellt und der durchschnittliche Plenumsdruck oben und unten gemessen. Anschließend werden die Gleichstrommotoren ausgeschaltet. Nun werden die Walzen per Hand gedreht bis in dem oberen und dem unteren Plenum der vorher gemessene Durchschnittsdruck vorherrscht.

Mit Hilfe von Gleichung 2.15 wird zunächst für die verschiedenen Plenumsdrücke das  $C_\mu$  bestimmt. Auffallend ist, dass die Rückseitenanbauten einen hohen Einfluss auf die Ausblasungsgeschwindigkeit und somit auch auf  $C_\mu$  bei gleichem Plenumsdruck haben (siehe Tabelle 3.2). Durch die Anbauten kann der Strahl nicht so sauber wie bei der Basiskonfiguration die Zylinder entlang strömen, wodurch es einen Rückstau gibt, der den Plenumsdruck erhöht. Steuert man dann mit diesem Druck die Ausblasungsintensität, so ergeben sich andere Massenströme und somit auch andere Ausblasungsgeschwindigkeiten.

**Tabelle 3.2.:**  $C_\mu$  für die verschiedenen Konfigurationen und Plenumsdrücke

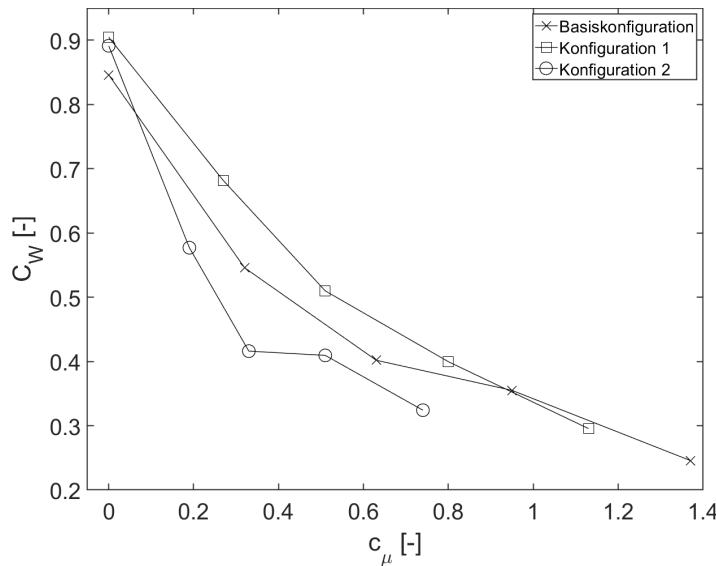
$p_{Pl}$ [kPa]	Basiskonfiguration	Konfiguration 1	Konfiguration 2
5	0,32	0,27	0,19
10	0,63	0,51	0,33
15	0,95	0,80	0,51
20	1,37	1,13	0,74

Die Ergebnisse für  $C_W$  sind in Abbildung 3.7 über  $C_\mu$  für die verschiedenen Hinterkan tenkonfigurationen zu sehen. Es ist ein deutlicher Abfall von  $C_W$  mit steigendem  $C_\mu$  für alle drei Konfigurationen zu sehen. Durch reine Ausblasung gelingt in Basiskonfiguration eine Widerstandsreduzierung von 71%, in Konfiguration 1 von 67% und in Konfiguration 2 von 64% im Vergleich zu ihren jeweiligen Referenzwerten ohne Aktuierung. Diese Werte wurden bei maximalem Plenumsdruck  $p_{Pl} = 20$  kPa erreicht.

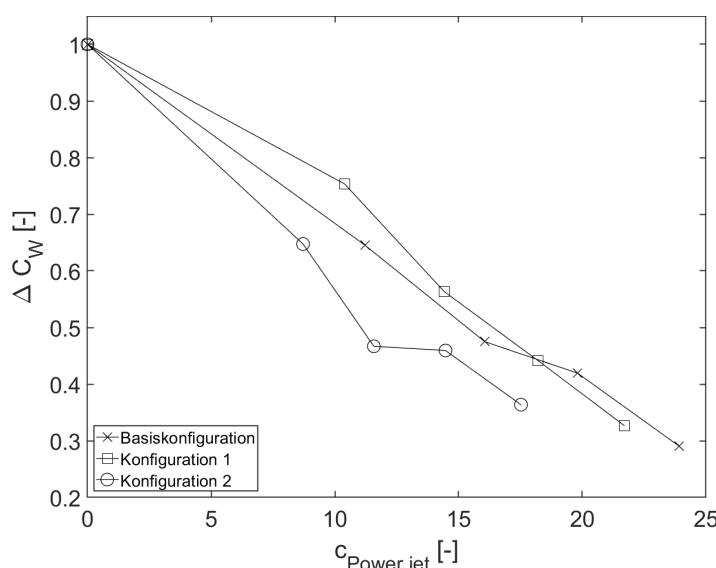
Um die Effektivität der drei Varianten besser untersuchen zu können, ist in Abbildung 3.8  $\Delta C_W$  über den Leistungskoeffizient  $C_{Power,jet}$  aufgetragen. Somit kann sehr gut abgelesen werden, welche Variante pro Leistungseinheit die größte Widerstandsreduzierung mit sich bringt. Linearisiert man den Verlauf und betrachtet die Steigungen der drei Varianten, ist zu erkennen, dass Konfiguration 2 mit  $\Delta C_W/C_{Power,jet} = -0,032$  die beste Effizienz aufweist. Vergleicht man die beiden anderen Varianten, ist es so, dass die Basiskonfiguration bei kleinem  $C_{Power,jet}$  zunächst besser ist, aber später von Konfiguration 1 eingeholt

wird. Somit haben beide Konfigurationen einen Bereich, in dem sie besser arbeiten als die andere.

Der positive Effekt der Ausblasung auf die Strömung ist ebenfalls in Bild 3.9 für  $C_\mu = 0,95$  in Basiskonfiguration zu sehen. Im Vergleich zur Referenz ohne Aktuierung in Bild 3.3 ist deutlich zu sehen, wie sich der Nachlauf des Modells nicht mehr so stark in vertikaler Richtung ausdehnt.



**Abbildung 3.7.:**  $C_W$  über  $C_\mu$  bei reiner Ausblasung für die drei Konfigurationen bei  $Re = 50000$



**Abbildung 3.8.:**  $\Delta C_W$  über  $C_{Power,jet}$  bei reiner Ausblasung für die drei Konfigurationen bei  $Re = 50000$



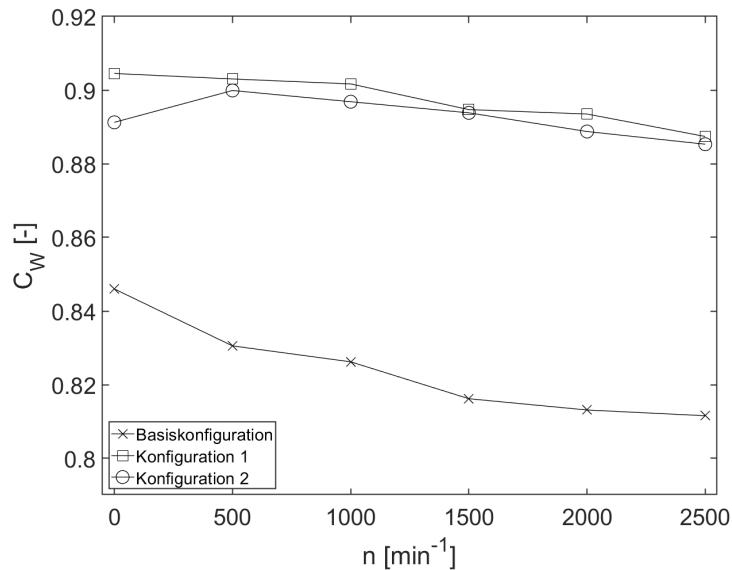
**Abbildung 3.9.:** Strömungsvisualisierung: Basiskonfiguration bei reiner Ausblasung mit  $C_\mu = 0,95$  bei  $Re = 50000$

### 3.2.2. Reine Rotation

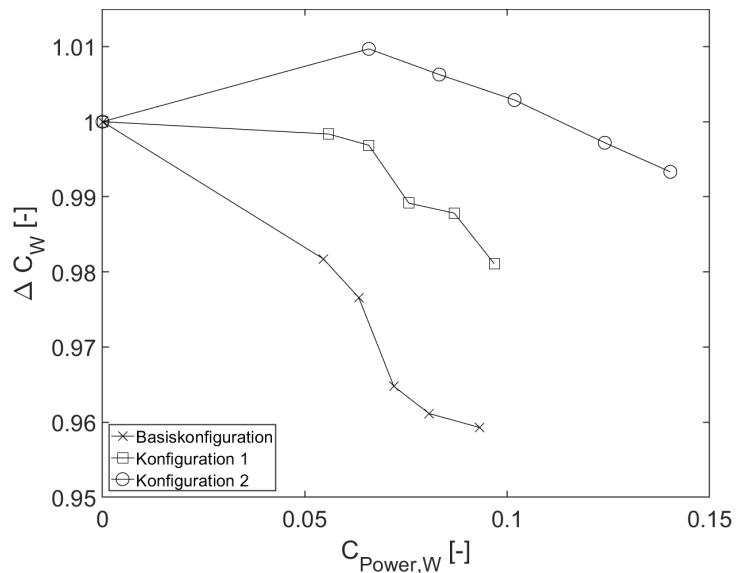
Die Ergebnisse für die Aktuierung durch reine Rotation der Walzen sind in Abbildung 3.10 zu sehen. Die hier zu verbuchenden Widerstandsreduzierungen bei  $n = 2500 \text{ min}^{-1}$  liegen für die Basiskonfiguration bei 4,1%, für die erste Konfiguration bei 1,9% und für die zweite Konfiguration bei 0,7%. Während die ersten beiden Varianten eine geringe aber deutliche Reduzierung zeigen, ist das Verhalten bei der Konfiguration 2 gänzlich anders. Hier hat die Aktuierung durch die Walzen zunächst einen Anstieg des Widerstands zur Folge, der erst ab dem Erreichen von  $n = 2000 \text{ min}^{-1}$  ausgeglichen ist. Es war zu erwarten, dass die Basiskonfiguration die besten Ergebnisse liefert, aufgrund der größten Walzenfläche, die Kontakt zur Strömung hat.

In Abbildung 3.11 ist  $\Delta C_W$  über den Leistungskoeffizienten  $C_{Power,W}$  aufgetragen.  $\Delta C_W$  ist dabei auf die Referenzwerte der jeweiligen Konfiguration ohne Aktuierung bezogen. Auch hier ist nochmal deutlich zu sehen, dass die Basiskonfiguration einen deutlich größeren Gewinn als die anderen beiden mit sich bringt.

Vergleicht man das  $\Delta C_W/C_{Power,W}$  mit dem der reinen Ausblasung, ist das Potenzial von rotierenden Walzen sichtbar. Mit  $\Delta C_W/C_{Power,W} = -0,37$  ist der Gewinn pro Leistungseinheit um über das 10 fache größer als bei reiner Ausblasung. Für Konfiguration 1 und 2 gelten  $\Delta C_W/C_{Power,W} = -0,18$  und  $\Delta C_W/C_{Power,W} = -0,04$ . Das schlechte Ergebnis für die Konfiguration 2 ist mit dem Widerstandsanstieg zu begründen und der Tatsache, dass die Motoren mehr Leistung benötigen, um gegen die Reibung mit dem PTFE Hinterteil anzukommen.



**Abbildung 3.10.:**  $C_W$  über  $n$  bei reiner Rotation für drei Konfigurationen bei  $Re = 50000$



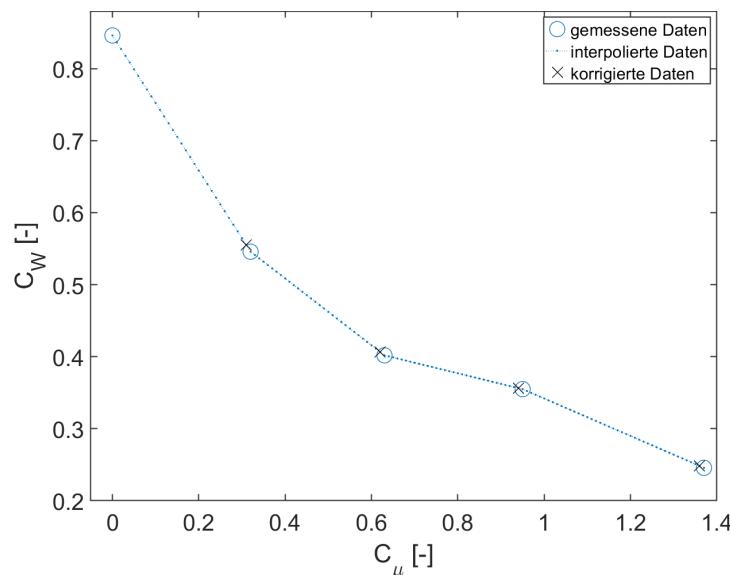
**Abbildung 3.11.:**  $\Delta C_W$  über  $n$  bei reiner Rotation für drei Konfigurationen bei  $Re = 50000$

### 3.2.3. Kombinierte Aktuierung

Nach anfänglicher Trennung der Aktuierungsmechanismen wird in diesem Abschnitt die Kombination aus Ausblasung und rotierenden Walzen untersucht. Zunächst muss die Tabelle 3.2 aktualisiert werden. Mit Einschalten der Wellen ist in fast allen Fällen die Ausblasungsgeschwindigkeit und somit  $C_\mu$  gesunken. Die Werte sind in Tabelle 3.3 zu sehen. Zu erwähnen ist, dass sich das  $C_\mu$  mit steigender Drehzahl nicht weiter geändert hat. Um die zu vor gemessenen Werte bei reiner Ausblasung, also  $n = 0 \text{ min}^{-1}$  mit aufzunehmen und zu vergleichen, müssen diese korrigiert werden. Dazu wird lineare Interpolation genutzt. Die gemessenen Daten für reine Ausblasung werden aufgetragen und anschließend werden die  $C_W$ -Werte für die in Tabelle 3.12 aufgezeigten  $C_\mu$  ermittelt. Die Korrektur der Daten ist beispielhaft für die Basiskonfiguration in Abbildung 3.12 zu sehen.

**Tabelle 3.3.:**  $C_\mu$  für die verschiedenen Konfigurationen bei kombinierter Aktuierung

$p_{Pl} [\text{kPa}]$	Basiskonfiguration	Konfiguration 1	Konfiguration 2
5	0,31	0,25	0,18
10	0,62	0,48	0,34
15	0,94	0,76	0,52
20	1,36	1,08	0,73



**Abbildung 3.12.:** Korrektur der  $C_W$ -Werte der reinen Ausblasung durch lineare Interpolation für die Basiskonfiguration

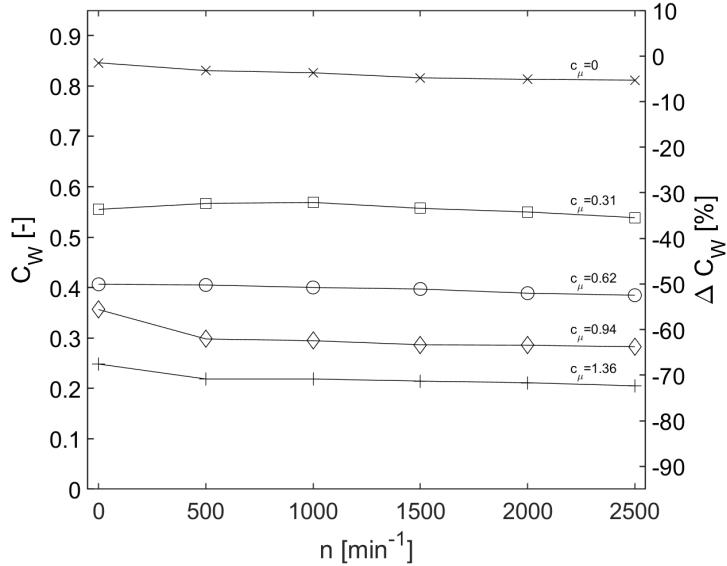
## Basiskonfiguration

Für die Basiskonfiguration ist in Abbildung 3.13  $C_W$  über  $n$  für die verschiedenen  $C_\mu$  eingezeichnet. Auf der rechten y-Achse ist zusätzlich das  $\Delta C_W$  bezogen auf die Referenz ohne Aktuierung aufgetragen. In dem gewählten Messbereich konnte der Widerstand bei maximaler Aktuierung (Rotation und Ausblasung) um 76% reduziert werden. Für diesen Fall ist in Bild 3.14 zu sehen, wie sich auch hier die Nachlaufdelle in vertikale Richtung verkleinert und keine Kármánsche Wirbelstraße mehr vorhanden ist.

Aus den Daten geht aber ebenfalls hervor, dass für  $C_\mu = 0,31$  der Widerstand steigt, sobald man die Walzen dazuschaltet. Zur Untersuchung des Zusammenspiels von Drehzahl und  $C_\mu$  ist in Abbildung 3.15 der Widerstand mit dem Widerstandsbeiwert des jeweiligen  $C_\mu$  ohne Rotation normiert. So ist bei der angesprochenen Ausblasungsintensität  $C_\mu = 0,31$  eine Erhöhung des Widerstands mit Starten der Motoren zu sehen, die mit zunehmender Drehzahl sinkt. Bei  $n \approx 1500 \text{ min}^{-1}$  ist diese Erhöhung wieder ausgeglichen. Erst ab diesem Zeitpunkt ist der Widerstand geringer als ohne Aktuierung. Im Fall von  $C_\mu = 0,62$  sinkt dagegen der Widerstand von Anfang an, wenn auch nur schwach. Bei  $C_\mu = 0,94$  findet ein schlagartiger Widerstandseinbruch von 17% bei Einschalten der Walzen statt. Eine weitere Erhöhung der Drehzahl hat einen geringeren Gewinn zur Folge. Bei dieser Ausblasungsintensität ist der Gewinn durch Zuschalten der Wellen mit 20% bei maximaler Drehzahl im Vergleich zu 16% bei  $C_\mu = 1,36$  am höchsten. So ist es bei dieser Konfiguration der Fall, dass eine kombinierte Aktuierung ab einer bestimmten Ausblasungsintensität besonders effektiv ist.

Zur Untersuchung der Effizienz ist in Abbildung 3.16  $\Delta C_W$  über  $C_{Power,jet}$  mit Linien von konstantem  $C_{Power,W}$  (also Linien konstanter Drehzahl) aufgetragen. Schaut man sich die Steigung an, ist diese mit  $\Delta C_W/C_{Power,jet} \approx -0,026$  in allen Fällen quasi gleich. Im Gegensatz dazu ist in Abbildung 3.17  $\Delta C_W$  über  $C_{Power,W}$  mit Linien von konstantem  $C_{Power,jet}$  (also Linien konstanter Ausblasung) aufgetragen. Hier ist zu sehen, dass der Gewinn für jede Ausblasungsintensität anders ist. So ist bei geringen Ausblasungsintensitäten der Vorteil durch die angetriebenen Walzen deutlich geringer als bei großen. Im Fall von  $C_{Power,jet} = 0$  liegt die Steigung bei  $\Delta C_W/C_{Power,W} \approx -0,370$ . Aktuiert man nun aber mit  $C_{Power,jet} = 19,8$ , so folgt  $\Delta C_W/C_{Power,W} \approx -0,92$ . Somit ist die Effektivität der Welle deutlich besser als würde sie die alleinige Aktuierung übernehmen. Doch es ist wichtig den richtigen Arbeitsbereich zu finden, da es sonst möglich ist, das Gegenteil zu bewirken, wodurch die Walzen weniger effektiv sind als würde man sie ohne Ausblasung betreiben.

Ebenfalls sei nochmal auf den Unterschied zwischen Ausblasung und Walzen hingewiesen. Die Aktuierung durch Walzen mit  $\Delta C_W/C_{Power,W} = -0,92$  ist deutlich effektiver als die



**Abbildung 3.13.:**  $C_W$  über  $n$  bei kombinierter Aktuierung für verschiedene  $C_\mu$  für die Basiskonfiguration bei  $Re = 50000$

Aktuierung durch Ausblasung mit  $\Delta C_W/C_{Power,jet} = -0,026$ .

Ein weiterer wichtiger Faktor der bei aktiven Strömungskontrolle eine Rolle spielt, ist die Leistungsersparnis. Eine Widerstandsreduzierung bringt keinen Gewinn, wenn man mehr Energie in die Aktuierung hereinstellt als man wieder herausbekommt. Die benötigte Leistung, um den aerodynamischen Widerstand einer Körpers zu überwinden, ist [11]:

$$P_0 = W_0 \cdot V_\infty = \frac{\rho}{2} \cdot C_{W0} \cdot A_{Körper} \cdot V_\infty^3, \quad (3.2)$$

wobei die Terme mit dem Indize 0 denen der jeweiligen Konfiguration ohne Aktuierung entsprechen und  $A_{Körper}$  die Fläche des Stumpfkörpers ist, der in der Strömung liegt. Die Leistung, die die Ausblasung zum Aktuieren benötigt, lässt sich wie folgt berechnen:

$$P_{jet} = \frac{1}{2} \dot{m}_{jet} \cdot V_\infty^2. \quad (3.3)$$

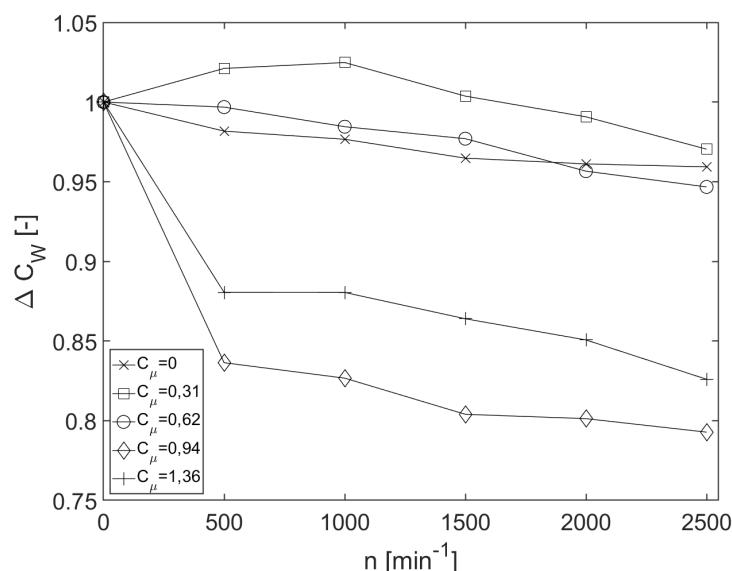
Sowohl diese als auch die Leistung, die für den Antrieb der Walzen benötigt wird, muss von den Leistungsersparnissen abgezogen werden, die durch die Widerstandsreduzierung ausgehen. Somit folgt für die gesamte netto Leistungsersparnis:

$$\frac{\Delta P}{P_0} = \frac{\Delta C_W}{C_{W0}} - 2 \frac{P_{jet}}{P_0} - 2 \frac{P_W}{P_0}, \quad (3.4)$$

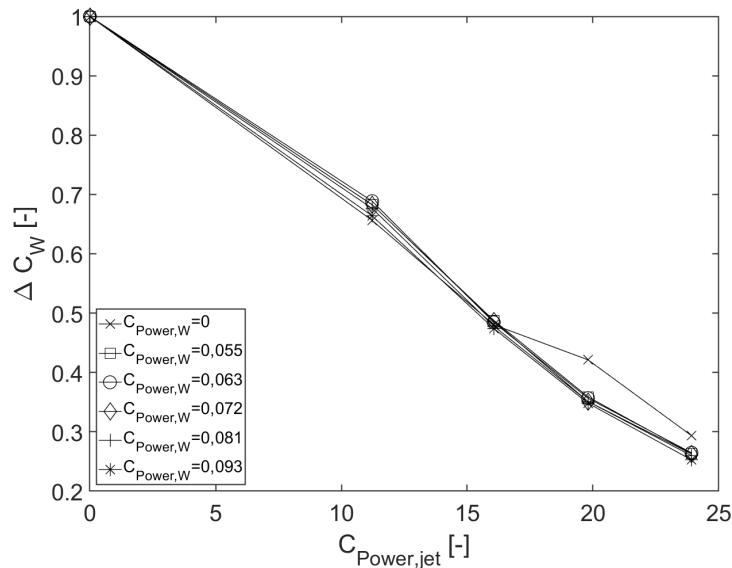
wobei  $P_W$  die von einer Walze benötigte Leistung ist. In Abbildung 3.18 ist diese netto Leistungsersparnis über die Walzendrehzahl für die verschiedenen  $C_\mu$  in Basiskonfiguration aufgetragen. Zu sehen ist, dass in fast allen Fällen kein Gewinn gemacht wird - lediglich ohne Ausblasung und mit  $C_\mu = 0,31$ . Grund hierfür ist der große Leistungsbedarf der Ausblasung. So beträgt  $P_{jet}/P_0 = 9,6$  bei  $C_\mu = 1,36$ . Im Vergleich dazu beträgt  $P_W/P_0$  bei  $n = 2500 \text{ min}^{-1}$  lediglich 0,25. Zu sagen sei an dieser Stelle, dass die Geometrie der Aktuierungsmechanismen nicht optimiert sind. So kann eine bessere Effizienz durch Optimierung der Ausblasungspalthöhe und des Walzendurchmessers erreicht werden.



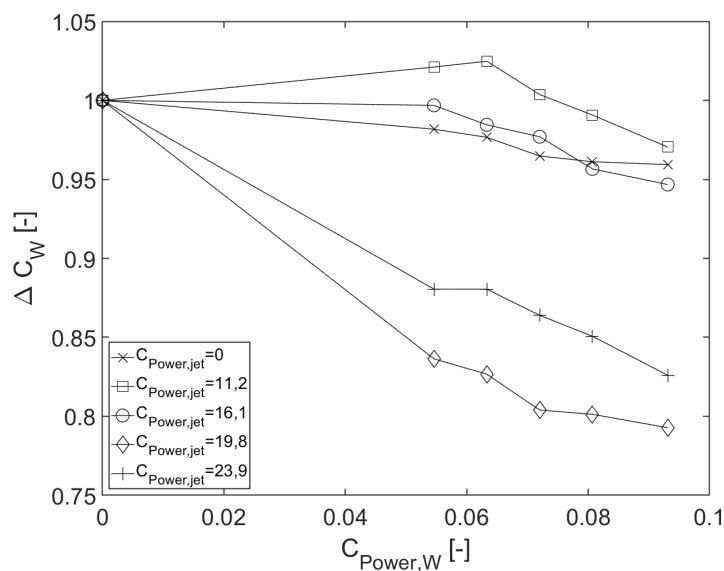
**Abbildung 3.14.:** Strömungsvisualisierung: Basiskonfiguration bei kombinierter Aktuierung mit  $C_\mu = 1,36$  und  $n = 2500 \text{ min}^{-1}$  bei  $Re = 50000$



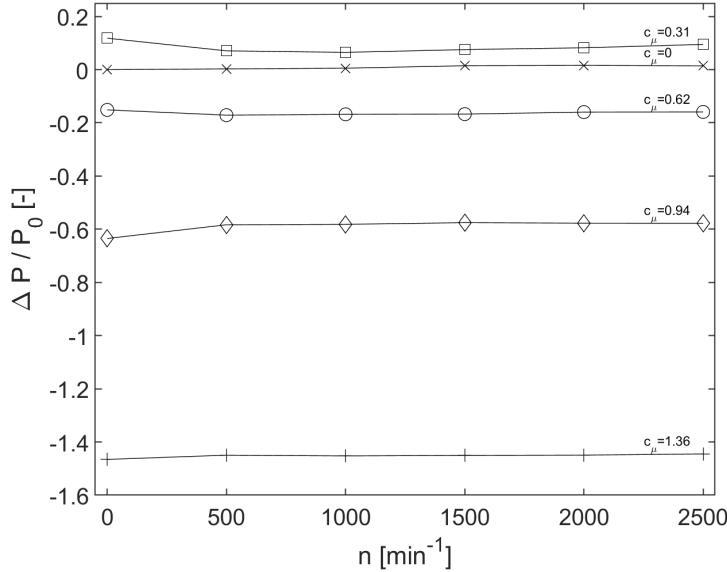
**Abbildung 3.15.:**  $\Delta C_W$  über  $n$  bei kombinierter Aktuierung für verschiedene  $C_\mu$  für die Basiskonfiguration bei  $Re = 50000$



**Abbildung 3.16.:**  $\Delta C_W$  über  $C_{Power,jet}$  bei kombinierter Aktuierung für verschiedene  $C_{Power,W}$  für die Basiskonfiguration bei  $Re = 50000$



**Abbildung 3.17.:**  $\Delta C_W$  über  $C_{Power,W}$  bei kombinierter Aktuierung für verschiedene  $C_{Power,jet}$  für die Basiskonfiguration bei  $Re = 50000$



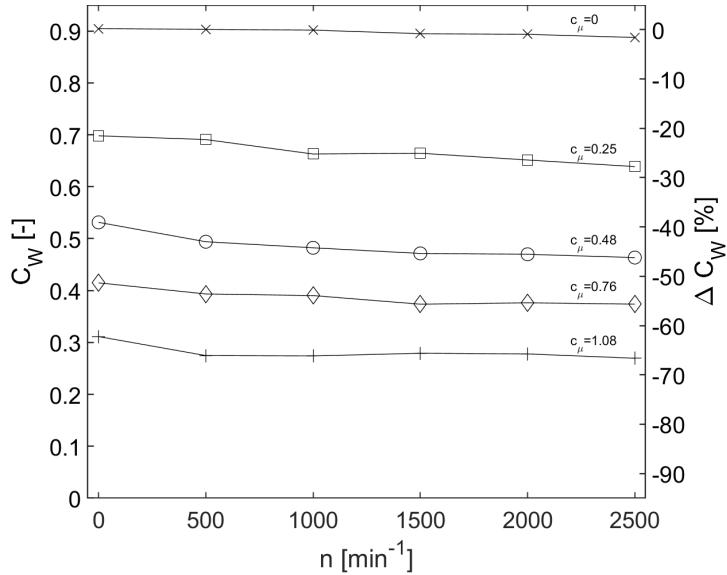
**Abbildung 3.18.:**  $\Delta P / P_0$  über  $n$  für unterschiedliche  $C_\mu$  in der Basiskonfiguration bei  $Re = 50000$

### Konfiguration 1

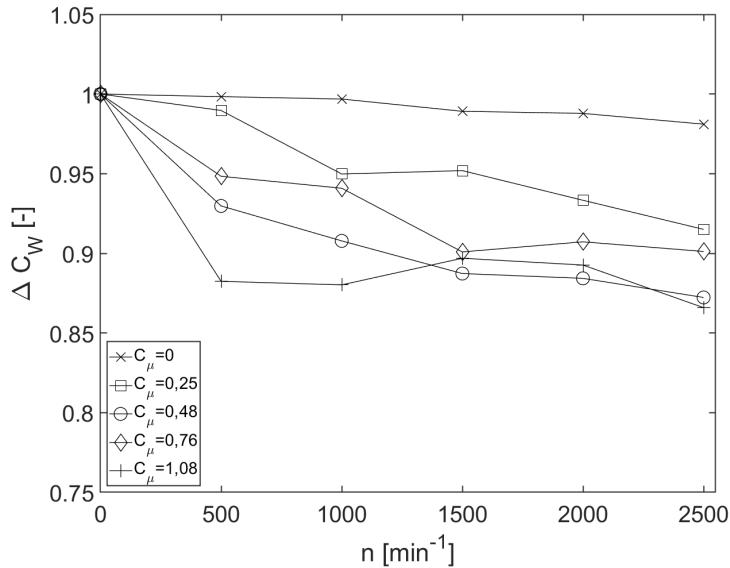
Die Ergebnisse für die Konfiguration 1 sind in Abbildung 3.19 dargestellt. Die maximale Reduzierung beträgt hier 70%. Betrachtet man wieder den Drehzahleinfluss auf die verschiedenen Ausblasungsintensitäten (Abbildung 3.20), ist ein deutlich unruhigeres Verhalten als zuvor zu erkennen. Grundsätzlich lässt sich aber vorab sagen, dass es im Vergleich zur Basiskonfiguration keine Kombinationen gibt, in denen der Widerstand höher ist als die Referenz. Außerdem ist der Einfluss der Walzen deutlich geringer im Gegensatz zur vorherigen Messungen der Basiskonfiguration.

Betrachtet man  $C_\mu = 0,25$  in Abbildung 3.20 ist grundsätzlich eine deutliche Verringerung des Widerstands zu erkennen. Jedoch ist bei  $n = 1000 \text{ min}^{-1}$  ein Einbruch vorhanden. Als Grund hierfür werden Schwankungen des Plenumsdrucks vermutet. Wie in Abschnitt 2.2 erwähnt, wurde zur Versorgung der Plenen die Hausdruckluftversorgung genutzt. Doch trotz des Lufttanks zur Pufferung konnten oftmals Druckschwankungen wahrgenommen werden, die immer wieder nachjustiert werden mussten, um den Plenumsdruck konstant zu halten. Solche Abweichungen sind auch in einigen der weiteren Ausblasungsintensitäten zu sehen. Die Verläufe von  $C_\mu = 0,48$  und  $0,76$  zeigen wie auch schon bei  $C_\mu = 0,25$  eine konstante Verbesserung der Walzeneffektivität, wobei diese bei  $C_\mu = 0,48$  interessanterweise höher ist als bei  $0,76$ . Im Fall von  $C_\mu = 1,08$  kommt es, wie schon zuvor bei der Basiskonfiguration, zu einer sehr starken Widerstandsreduzierung mit Einschalten der Walzen. Der größte Gewinn durch Walzen kann in dieser Konfiguration bei  $C_\mu = 1,08$  mit 14% erreicht werden.

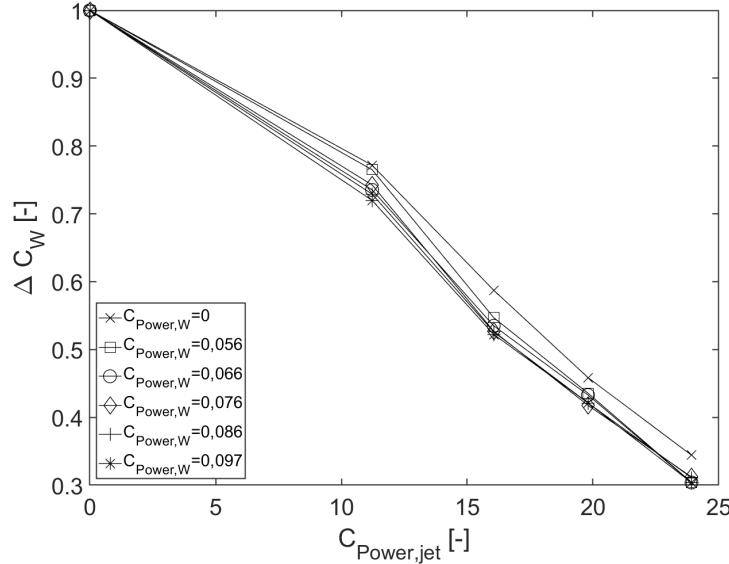
Wie auch schon bei der Basiskonfiguration wird mit den Abbildungen 3.21 und 3.22 die Effektivität untersucht. Es ist für 3.21 eine Steigung von  $\Delta C_W/C_{Power,jet} \approx -0,028$  zu sehen. Dies ist geringfügig besser als die Basiskonfiguration. Jedoch ist es hier so, dass für jede Ausblasungsintensität  $> 0$  der Gewinn durch Dazuschalten der Wellen größer wird (siehe Abbildung 3.22). Im besten Fall (bei  $C_\mu = 1,08$ ) gilt  $\Delta C_W/C_{Power,W} \approx -0,45$ .



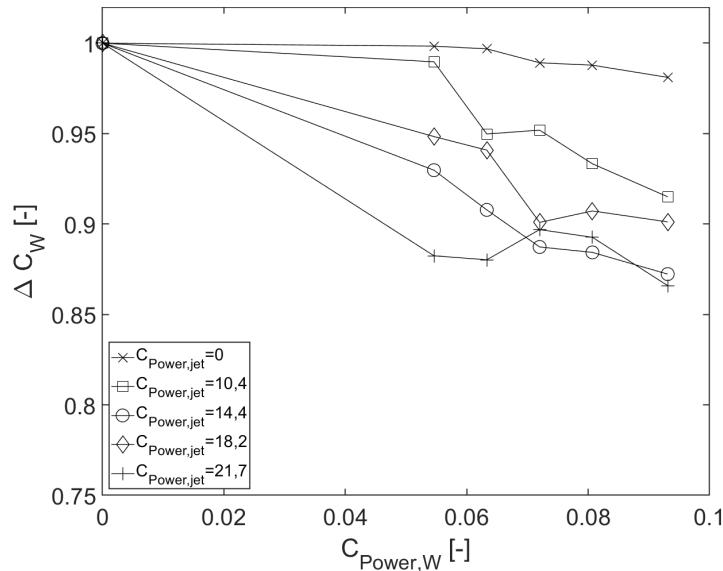
**Abbildung 3.19.:**  $C_W$  über  $n$  bei kombinierter Aktuierung für verschiedene  $C_\mu$  für Konfiguration 1 bei  $Re = 50000$



**Abbildung 3.20.:**  $\Delta C_W$  über  $n$  bei kombinierter Aktuierung für verschiedene  $C_\mu$  für Konfiguration 1 bei  $Re = 50000$

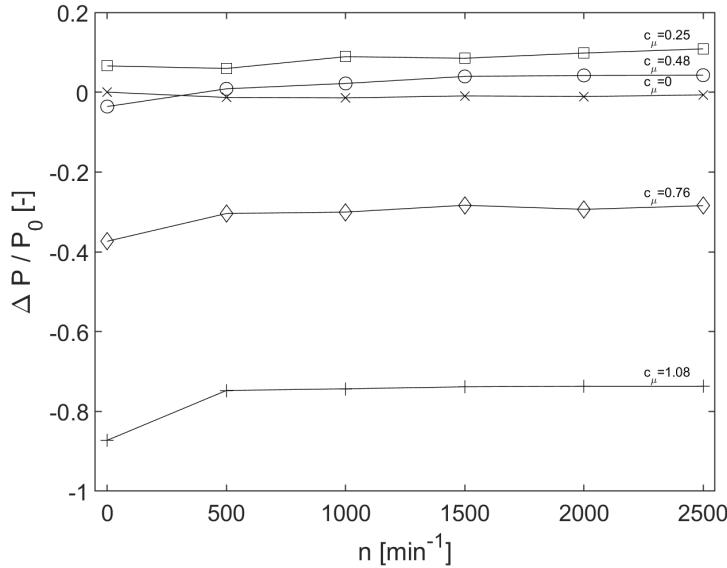


**Abbildung 3.21.:**  $\Delta C_W$  über  $C_{Power,jet}$  bei kombinierter Aktuierung für verschiedene  $C_{Power,W}$  für Konfiguration 1 bei  $Re = 50000$



**Abbildung 3.22.:**  $\Delta C_W$  über  $C_{Power,W}$  bei kombinierter Aktuierung für verschiedene  $C_{Power,jet}$  für Konfiguration 1 bei  $Re = 50000$

Betrachten wir wieder die Leistungsersparnis für diese Konfiguration (Abbildung 3.23), ist das Verhalten recht unterschiedlich zur Basiskonfiguration. Allgemein ist im Verlauf jeder Ausblasungsintensität eine Verbesserung der Situation durch die Walzen festzustellen. Dies war zu erwarten, da bei dieser Konfiguration schon  $C_W$  bei jeder Drehzahl sank. Die größte Ersparnis liefert die Konfiguration 1 bei  $C_\mu = 0,25$  und  $n = 2500 \text{ min}^{-1}$  mit 11%. Im Fall von  $C_\mu = 0,48$  und  $n = 0 \text{ min}^{-1}$  wird zunächst Verlust gemacht, der erst bei  $n = 500 \text{ min}^{-1}$  in Gewinn umschlägt, der sich mit zunehmender Drehzahl steigert.



**Abbildung 3.23.:**  $\Delta P / P_0$  über  $n$  für unterschiedliche  $C_\mu$  in Konfiguration 1 bei  $Re = 50000$

## Konfiguration 2

Als Drittes werden die Ergebnisse der Konfiguration 2 in Abbildung 3.24 betrachtet. Hier kann der Widerstand im Messbereich um 72,0% gesenkt werden. Für den Fall der maximalen Aktuierung ist auch hier in Bild 3.26 die Strömung mit Rauch sichtbar gemacht worden. Es ist zu sehen, dass sich keine Wirbelstraße mehr bildet und der Nachlauf deutlich kleiner geworden ist im Gegensatz zur Referenz ohne Aktuierung.

Bei Betrachtung des Drehzahleinfluss in Abbildung 3.25 ist auch, wie in der Basiskonfiguration, eine Erhöhung des Widerstands mit Einschalten der Walzen für  $C_\mu = 0,18$  zu sehen. Hier ist der Widerstand um bis zu 10% höher als die Referenz ohne Aktuierung und somit deutlich dramatischer als in dem vorangegangenen Fall. In dem getesteten Messbereich ist dieser Verlust auch bei maximaler Drehzahl nicht wieder auszugleichen. Gleicher gilt auch für  $C_\mu = 0,34$ , jedoch bleibt der Widerstand bei  $n = 500 \text{ min}^{-1}$  zunächst quasi gleich und steigt dann bis  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$  an. Erst von da an sinkt der  $C_W$ -Wert wieder. Bei höheren Ausblasungsintensitäten ist aber auch bei dieser Konfiguration wieder ein plötzlicher Umschlag zu sehen. So findet eine Verbesserung von ca. 18% für  $C_\mu = 0,52$  und  $0,73$  statt. Interessanterweise verlaufen diese beiden Kurven beinahe aufeinander. Grundsätzlich ist bei der Konfiguration 2 ein deutlich höherer Einfluss der Walzen festzustellen, also bei den beiden anderen Varianten. Sogar im Vergleich zu der Basiskonfiguration, die deutlich sensibler auf die Walzen Drehzahl bei reiner Rotation reagiert. So kann hier der Widerstand bei  $C_\mu = 0,73$  durch Walzen mit  $n = 2500 \text{ min}^{-1}$  um weitere 24% gesenkt werden.

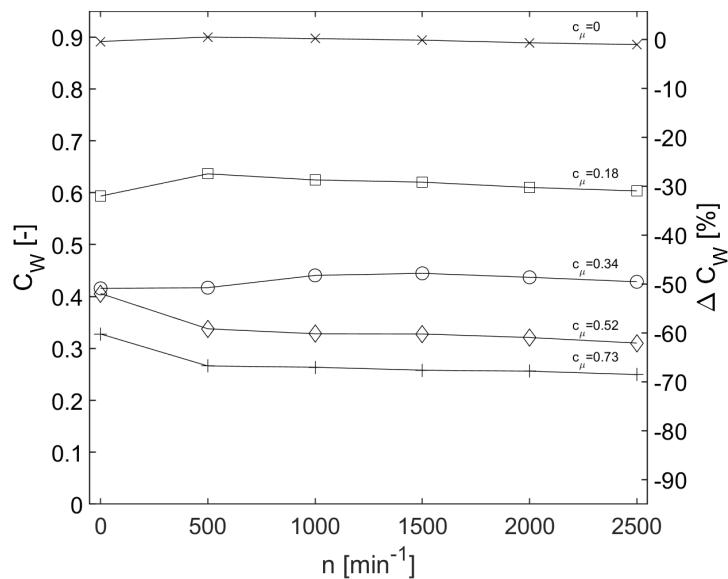


Abbildung 3.24.:  $C_W$  über  $n$  bei kombinierter Aktuierung für verschiedene  $C_\mu$  für Konfiguration 2 bei  $Re = 50000$

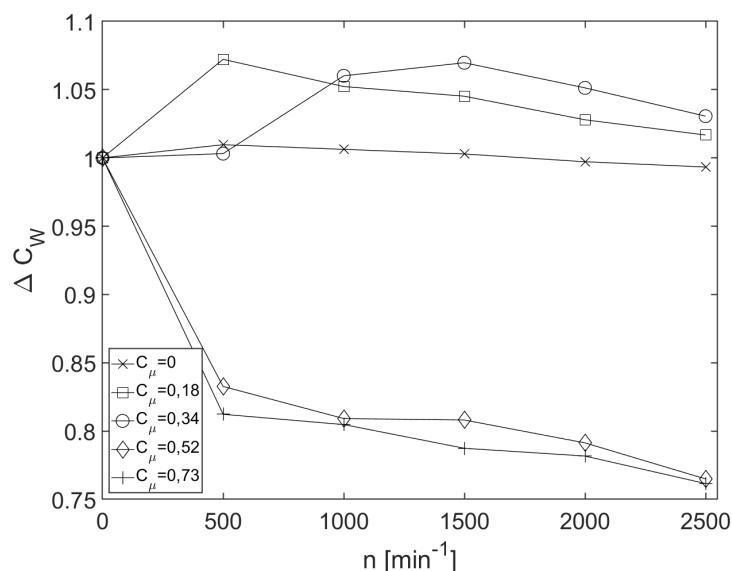


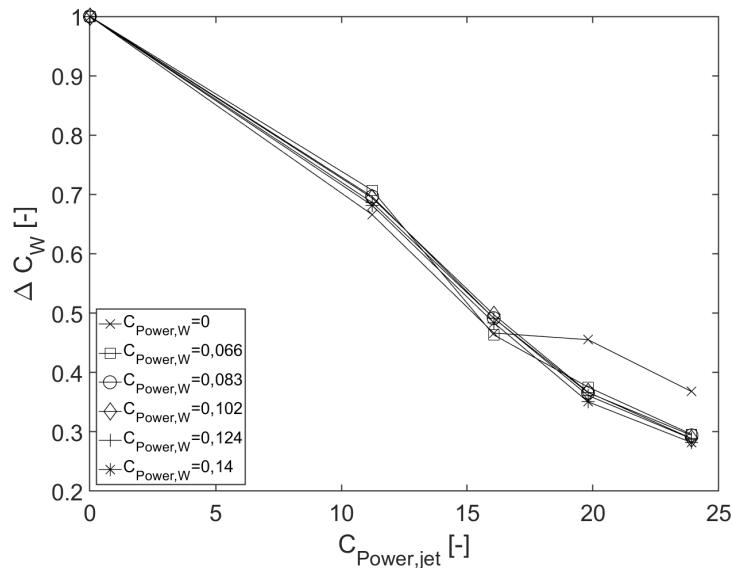
Abbildung 3.25.:  $\Delta C_W$  über  $n$  bei kombinierter Aktuierung für verschiedene  $C_\mu$  für Konfiguration 2 bei  $Re = 50000$



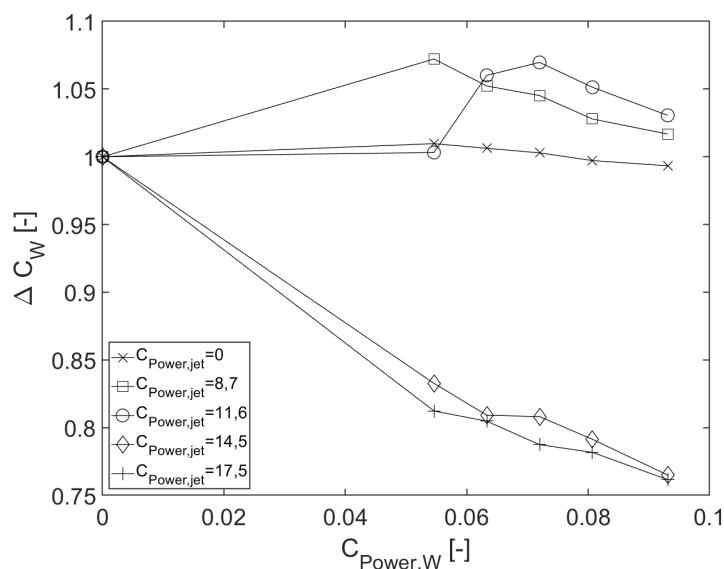
**Abbildung 3.26.:** Strömungsvisualisierung: Konfiguration 1 bei kombinierter Aktuierung mit  $C_\mu = 0,73$  und  $n = 2500 \text{ min}^{-1}$  bei  $Re = 50000$

Schaut man sich  $\Delta C_W$  über  $C_{Power,jet}$  in Abbildung 3.27 an, stellt sich  $\Delta C_W/C_{Power,jet} \approx -0,032$  ein. Dies ist bezogen auf die Ausblasung der beste Wert von allen drei Konfigurationen. Im Fall von  $\Delta C_W$  über  $C_{Power,W}$  in Abbildung 3.28 sind zwei unterschiedlich Szenarien zu beobachten. Bei  $C_{Power,W}$  bis 11,6 verlieren die Walzen an Effektivität und haben weniger Gewinn zur Folge als durch Rotation alleine. Für  $C_{Power,W} = 14,5$  und 17,5 ist dagegen ein sehr starker Gewinn zu verbuchen. Für zweiteres ist  $\Delta C_W/C_{Power,W} \approx -0,63$ . Dies ist zwar deutlich geringer als im Fall der Basiskonfiguration, jedoch hat dies mit hoher Reibung zwischen Walzen und PTFE Hinterteil zu tun. Hierdurch benötigen die Walzen deutlich mehr Energie, um auf die gleichen Drehzahlen zu kommen. Ginge man davon aus, dass die Reibung nicht wäre und der Motor die gleiche Leistung wie in der Basiskonfiguration benötige, wäre das  $\Delta C_W/C_{Power,W}$  hier 0,97. Wäre es also möglich, die Konfiguration ohne bzw. mit weniger Reibung zu betreiben, wäre die Effektivität hier am höchsten.

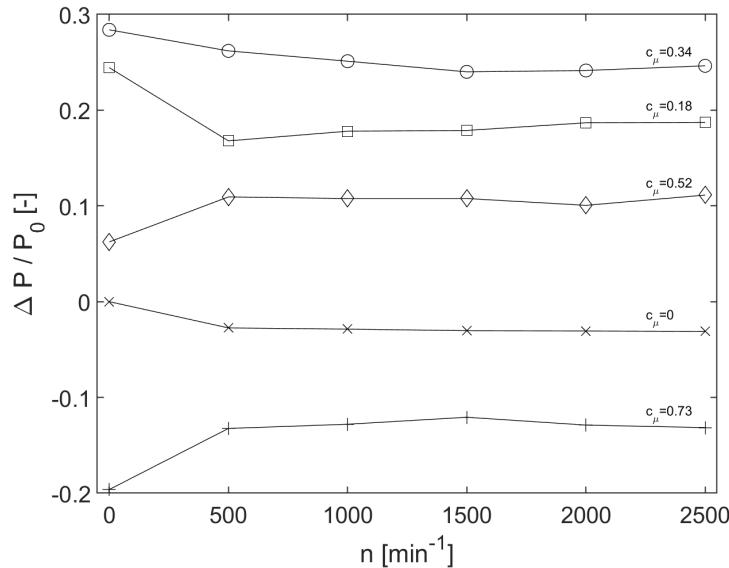
Bezüglich der Leistungsersparnis aus Abbildung 3.29 ist ersichtlich, dass die Konfiguration 2 im Vergleich der Konfigurationen das beste Ergebnis mit einer Leistungsersparnis von 24% bei  $C_\mu = 0,34$  und  $n = 0 \text{ min}^{-1}$  liefert. Leider ist auch hier die Widerstandserhöhung bei niedrigen Ausblasungsintensität der Grund, warum die Walzen bei niedrigem  $C_\mu$  einen negativen Einfluss haben. Zusätzlich benötigen die Motoren bei dieser Variante grundsätzlich mehr Leistung aufgrund des PTFE Hinterteils, das in Kontakt mit den Walzen steht und somit die Reibung erhöht. Somit ist es wie bei der Basiskonfiguration so, dass eine reine Ausblasung hier am effektivsten ist. Doch bei dieser Variante ist der Bereich, in denen eine Ersparnis erzielt wird, deutlich höher als bei den anderen.



**Abbildung 3.27.:**  $\Delta C_W$  über  $C_{Power,jet}$  bei kombinierter Aktuierung für verschiedene  $C_{Power,W}$  für Konfiguration 1 bei  $Re = 50000$



**Abbildung 3.28.:**  $\Delta C_W$  über  $C_{Power,W}$  bei kombinierter Aktuierung für verschiedene  $C_{Power,jet}$  für Konfiguration 1 bei  $Re = 50000$



**Abbildung 3.29.:**  $\Delta P/P_0$  über  $n$  für unterschiedliche  $C_\mu$  in Konfiguration 2 bei  $Re = 50000$

### Vergleich der Konfigurationen

Um nun eine Aussage über die am besten geeignete Konfiguration für kombinierte Aktuierung zu machen, sind in Tabelle 3.4 die besten Ergebnisse der jeweiligen Konfigurationen zusammengefasst. Gut geeignet für eine solche Aktuierung ist eine Konfiguration, in der die Effektivität der Walzen durch die Ausblasung verstärkt wird, also einen Synergieeffekt mit sich bringen. Schaut man sich in der unten aufgeführten Tabelle den Unterschied zwischen  $\Delta C_W/C_{Power,W}$  ohne und mit Ausblasung an, ist zu sehen, dass es in der Basiskonfiguration möglich ist, die Effektivität der Walzen um 60% verbessern. Gleiches gilt für die Konfiguration 1. Im Fall der Konfiguration 2 ist es sogar möglich, die Effektivität der Walzen um 94% zu steigern. Somit steckt in der Konfiguration 2 das größte Potenzial, das zu diesem Zeitpunkt aber noch nicht ausgeschöpft ist. Dennoch bietet die Basiskonfiguration das beste  $\Delta C_W/C_{Power,W}$ . Reduziert man aber die Reibung mit dem PTFE Hinterteil oder konstruiert eine Variante bei der die Strömung genauso an der Basis entlang läuft, aber ohne Reibung, ist diese Konfiguration wahrscheinlich die beste Variante. Allgemein ist das Potenzial aller Varianten wahrscheinlich höher als in diesen Untersuchungen. So kann durch Optimierung der Spalthöhe und der Wellengeometrie bessere Effizienz erreicht werden. Außerdem kann auch eine bessere Fertigung durch zum Beispiel exakt rund laufende Walzen eine Verbesserung bringen.

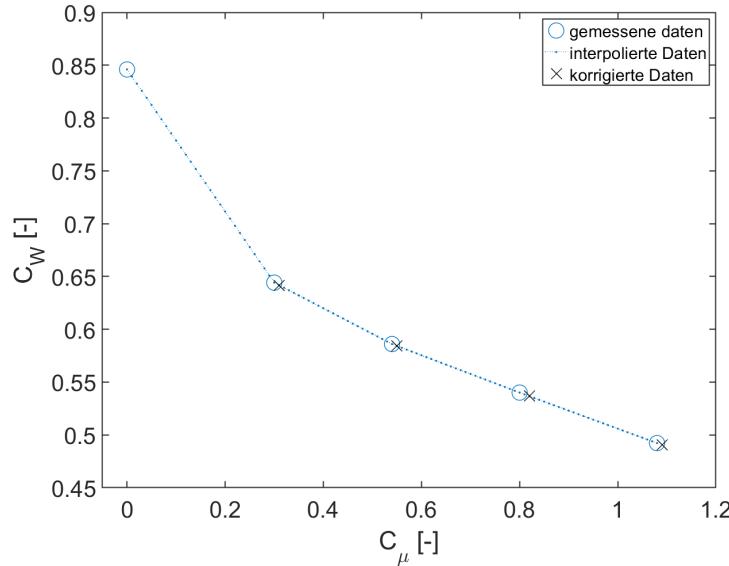
**Tabelle 3.4.:** Zusammentragung der Ergebnisse zum Vergleich der Konfigurationen

	Basiskonf.	Konf.1	Konf.2
$\Delta C_W$	76%	70%	72%
$\Delta C_W / C_{Power,W}$ ohne Ausblasung	-0,37	-0,18	-0,04
$\Delta C_W / C_{Power,W}$ mit Ausblasung	-0,92	-0,45	-0,63
Steigerung Walzeneffektivität	60%	60%	94%

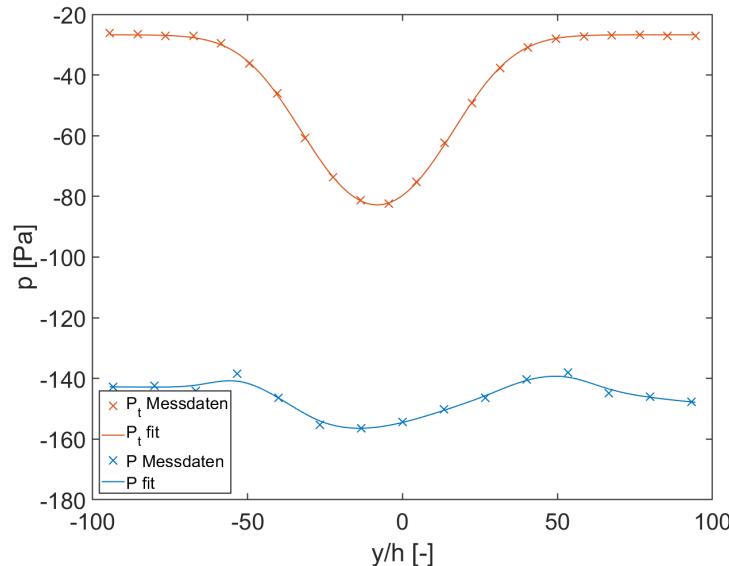
### 3.2.4. Einseitige Aktuierung

Zusätzlich zur symmetrischen Aktuierung mit glatten Wellen, wurde der Effekt bei einseitiger Aktuierung untersucht. Die Messungen fanden in der Basiskonfiguration und der zweiten Konfiguration mit kombinierter Aktuierung und reiner Rotation auf der Oberseite statt. Die Plenumsdrücke und Drehzahl sind gleich denen der beidseitigen Aktuierung. Grundsätzlich ist an dieser Stelle zu sagen, dass die Messungen aufgrund der angewendeten Messmethode höhere Messunsicherheit mit sich bringen. Solch asymmetrische Untersuchungen finden zum Beispiel bei Untersuchungen von schweren Kraftfahrzeugen wie in der Arbeit von *Choi u. a.* [4] statt, in denen der Effekt des Bodens eine große Rolle spielt. In diesem Experiment ist dies nicht der Fall. Aufgrund der Tatsache, dass das Modell bei einseitiger Aktuierung frei in der Luft liegt, ist mit deutlich höheren Winkeln der abgehenden Strömungen zu rechnen. So ist es möglich, dass der Messrädchen an der genutzten Position nicht weit genug von dem Modell entfernt ist. In Abbildung 3.31 ist die ungleichmäßige statische Druckverteilung für den Fall  $C_\mu = 2,12$  und  $n = 2500 \text{ min}^{-1}$  zu sehen. Trotz der Tatsache, dass die absoluten Werte vor allem mit zunehmender Ausblasungsintensität höhere Messunsicherheiten besitzen, findet an dieser Stelle eine Auswertung für die beiden getesteten Konfigurationen statt, um für die Zukunft eine Idee des Verhaltens zu haben.

Auch hier fand eine Korrektur der Daten bei reiner Ausblasung statt, beispielhaft für die Basiskonfiguration in Abbildung 3.30 zu sehen. Interessanterweise hat hier, im Gegensatz zur beidseitigen Aktuierung das Zuschalten der Welle eine Erhöhung von  $C_\mu$  zur Folge. Aus diesem Grund musste der jeweilige letzte Wert bei maximaler Ausblasung extrapoliert werden.



**Abbildung 3.30.:** Korrektur der  $C_W$ -Werte der reinen, einseitigen Ausblasung durch lineare Interpolation für die Basiskonfiguration



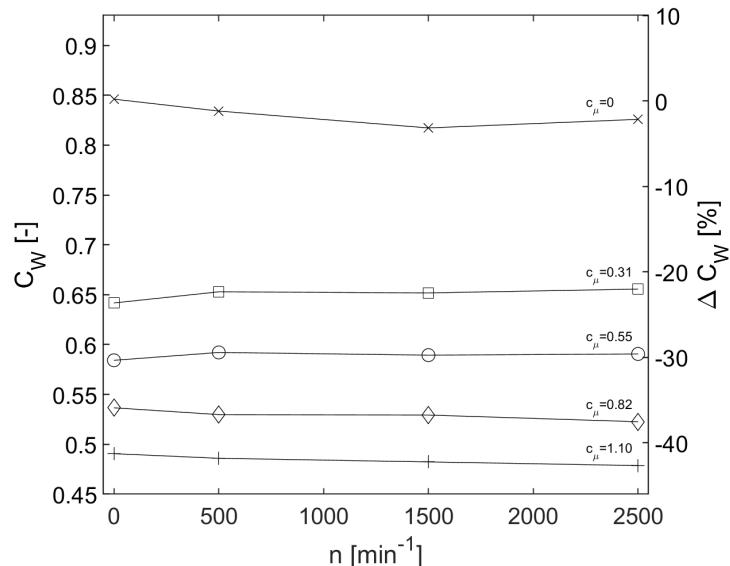
**Abbildung 3.31.:** Druckverteilung im Rächen bei einseitiger Aktuierung mit  $C_\mu = 2, 12$  und  $n = 2500 \text{ min}^{-1}$  in Basiskonfiguration

### Basiskonfiguration

Die Ergebnisse für die Basiskonfiguration bei einseitiger Aktuierung sind in Abbildung 3.32 zu sehen. Es gelang,  $C_W$  um 43% zu verringern. Der  $\Delta C_W$  Verlauf ist in Abbildung 3.33 dargestellt. Betrachtet man zunächst den Verlauf der reinen Rotation ( $C_\mu = 0$ ), so ist, wie in allen vorangegangenen Fällen, ein sinkender Widerstand zu beobachten. Im Fall von  $C_\mu = 0, 31$  und  $0, 55$  ist dagegen ein durchweg negatives Verhalten zu beobachten.

So scheint es in dem vorhandenen Messbereich zu einer Steigerung von  $C_W$  zu kommen, die nicht wie in vorangegangenen Messungen ab einem bestimmten Punkt wieder abflacht. Betrachtet man den Verlauf von  $C_\mu = 0,55$  ist dagegen eine Widerstandsreduzierung festzustellen, die aber quasi gleich dem der reinen Rotation ist. Somit ist hier die Effektivität der Walze nicht verbessert worden. Gleichermaßen gilt für  $C_\mu = 1,10$ .

In Abbildung 3.34 ist die Leistungsersparnis, wie auch schon aus den vorigen Ergebnissen, dargestellt. Zu sehen ist, dass im Vergleich zur beidseitigen Aktuierung in keinem Fall eine Ersparnis vorliegt. Der Verlust ist hier sogar um ein Vielfaches höher.



**Abbildung 3.32.:**  $C_W$  über  $n$  für unterschiedliche  $C_\mu$  mit einseitiger Aktuierung in Basiskonfiguration bei  $Re = 50000$

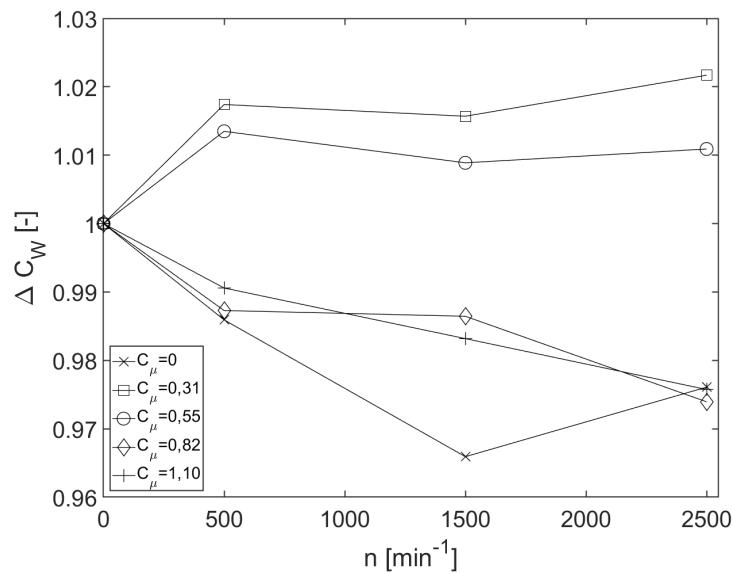


Abbildung 3.33.:  $\Delta C_W$  über  $n$  für unterschiedliche  $C_\mu$  mit einseitiger Aktuierung in Basiskonfiguration bei  $Re = 50000$

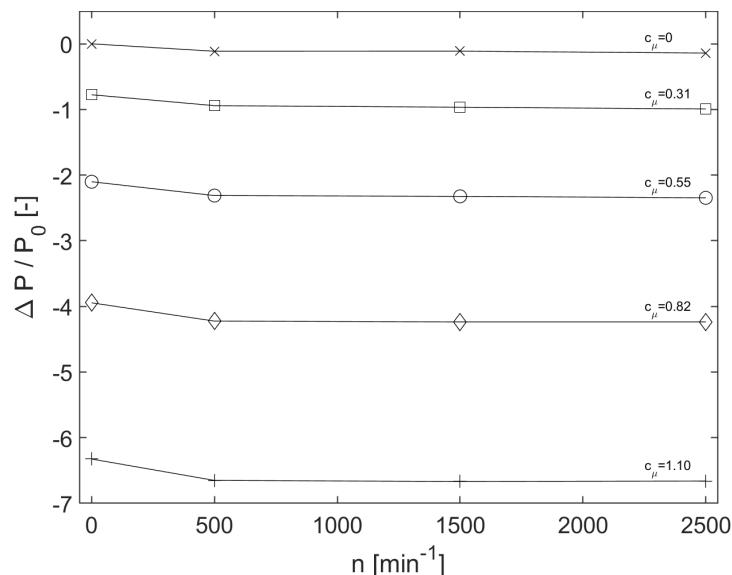


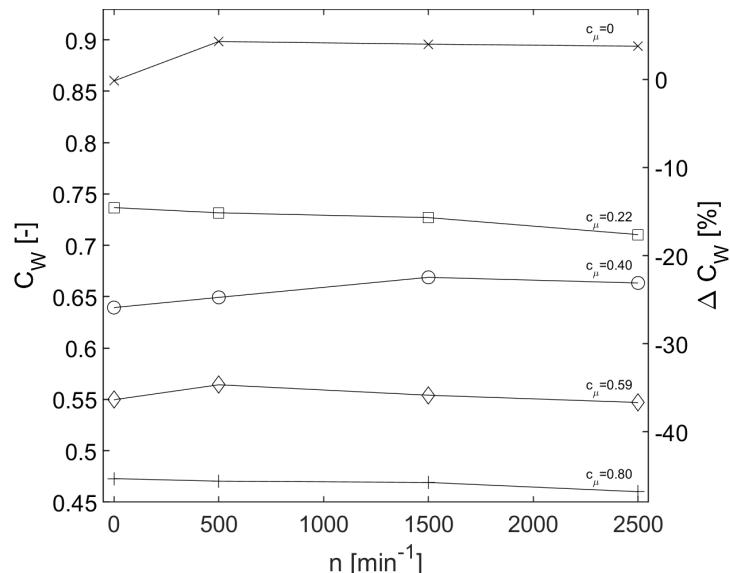
Abbildung 3.34.:  $\Delta P/P_0$  über  $n$  für unterschiedliche  $C_\mu$  mit einseitiger Aktuierung in Basiskonfiguration bei  $Re = 50000$

## Konfiguration 2

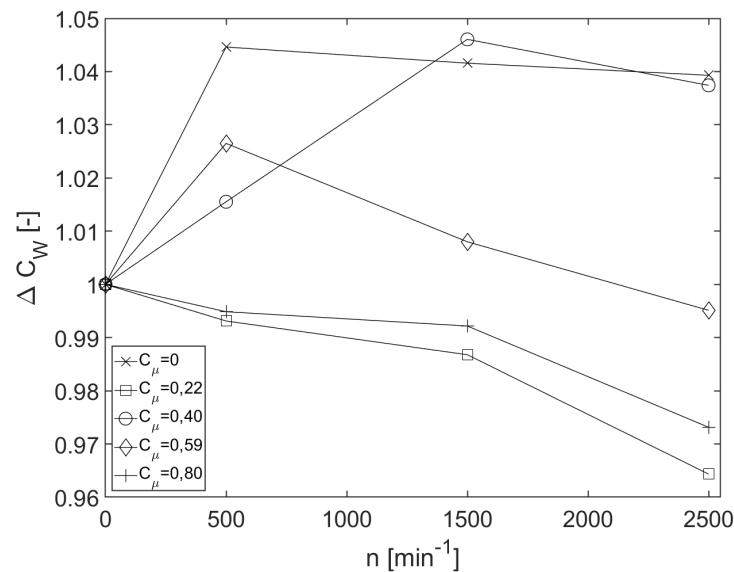
Für die Konfiguration 2 sind die Resultate in den Abbildungen 3.35 und 3.36 zu sehen. Hier war es möglich, den Widerstand um 46% zu senken. Bei dieser Variante ist es wie bei der beidseitigen Aktuierung in der gleichen Konfiguration so, dass Rotation alleine den Widerstand ansteigen lässt. Betrachtet man die kombinierten Aktuierungen ist kein wirkliches Muster zu erkennen. So findet ein Gewinn bei der niedrigsten  $C_\mu = 0,22$  und bei der höchsten Ausblasungsintensität  $C_\mu = 0,80$  statt. Die Werte dazwischen haben dagegen negative Effekte.

Allgemein lässt sich zu beiden Konfigurationen mit einseitiger Aktuierung sagen, dass sie zum einen deutlich weniger effektiv sind, da bei beidseitiger Aktuierung mit geringeren Ausblasungsintensitäten bessere Ergebnisse erzielt wurden. Außerdem entspricht dieser Einbaufall nicht einem realen Szenario. Eine solche asymmetrische Aktuierung hätte eine deutlich größere Bedeutung im bodennahen Bereich und nicht wie in diesem Fall frei schwebend.

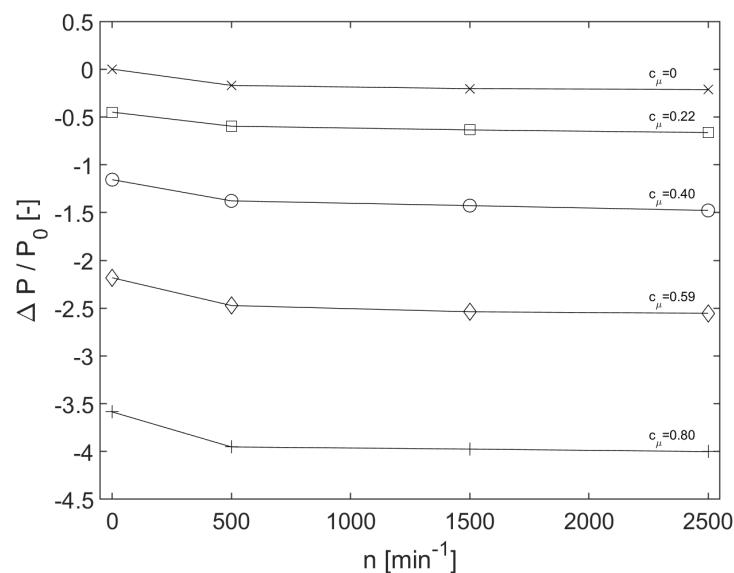
Auch hier ist in Abbildung 3.37 wieder die Leistungserspartis aufgetragen. Wieder ist kein Gewinn und ein deutlich höherer Verlust als bei beidseitiger Aktuierung zu sehen. Im Vergleich zur Konfiguration ist dieser Verlust aber geringer.



**Abbildung 3.35.:**  $C_W$  über  $n$  für unterschiedliche  $C_\mu$  mit einseitiger Aktuierung in Konfiguration 2 bei  $Re = 50000$



**Abbildung 3.36.:**  $\Delta C_W$  über  $n$  für unterschiedliche  $C_\mu$  mit einseitiger Aktuierung in Konfiguration 2 bei  $Re = 50000$



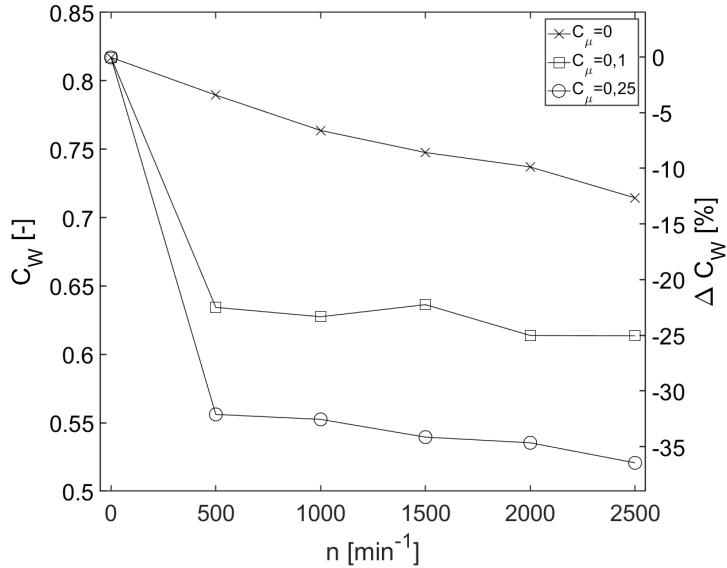
**Abbildung 3.37.:**  $\Delta P/P_0$  über  $n$  für unterschiedliche  $C_\mu$  mit einseitiger Aktuierung in Konfiguration 2 bei  $Re = 50000$

### 3.3. Periodische Aktuierung

In Abschnitt 2.2 wurde die vierte Variante des Stumpfkörpermodells vorgestellt. Durch Austausch der Welle soll eine periodische Aktuierung möglich sein. Nach Einbau der neuen Wellen und ersten Tests wurde festgestellt, dass der Aktuierungsstrahl nicht mehr tangential zur Welle austrat. Viel mehr war kein Jet mehr vorhanden. Die Luft ist in alle Richtungen ausgetreten. Die Vermutung legt nah, dass die Nuten mit  $0,6\text{ mm}$  nicht breit genug waren, sodass der Spalt zu keiner Zeit wirklich geöffnet war und die Nuten nur eine raue Welle erzeugten, die den Spalt verschlossen. Das Streuen der Luft wird in den  $C_W$ -Werten sichtbar. So wurde ohne Aktuierung für diese Konfiguration  $C_W = 0,793$  gemessen. Durch Aktuieren mit  $p_{Pl} = 5\text{ kPa}$  und  $n = 250\text{ min}^{-1}$  steigt der Widerstand auf  $C_W = 0,8207$ . Erhöht man den Plenumsdruck weiter, so reduziert sich zwar der Widerstand, jedoch hat dies nichts mit periodischer Aktuierung zu tun, sondern nur damit, dass sich die Lippen der Ausblasung aufbiegen und sich der Spalt somit öffnet.

Da so keine wirklichen Ergebnisse für periodische Aktuierung erzielt werden konnten, hat man sich dazu entschlossen, mit dieser gezahnten Welle eine Messreihe mit einem Luftsput zu fahren. In diesem Fall wird der Ausblasungsspalt also nicht periodisch geöffnet und geschlossen. Aufgrund der Konstruktion war es nicht möglich, diesen Spalt  $0,3\text{ mm}$  groß zu machen, um eine Vergleichbarkeit mit den vorangegangen Messungen zu schaffen. Da die Welle einen größeren Durchmesser als die vorherigen hatte, konnte diese nur so weit bewegt werden, dass sich ein Spalt zwischen  $0,05$  und  $0,1\text{ mm}$  einstellte. Diese Spalte wurde nicht auf ihre Gleichförmigkeit untersucht bzw. eingestellt. Interessanterweise scheint das Modell so empfindlich auf kleinste Veränderungen zu sein, dass sich nur durch das Bewegen der Walzen in vertikale Richtung der Widerstand verändert. Somit steigt der Referenzwiderstand ohne Aktuierung auf  $C_W = 0,817$ .

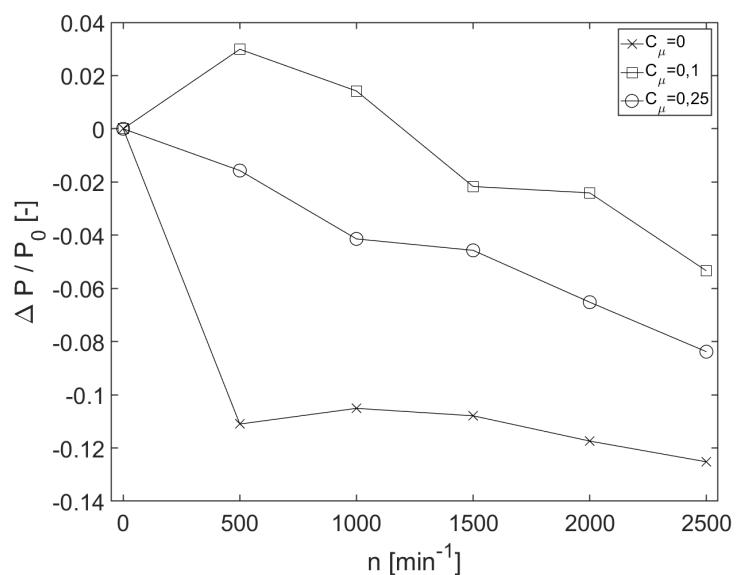
Wie *Modi* [13] bereits untersucht hat, haben Rauigkeiten auf den Aktuierungswalzen einen positiven Einfluss auf dessen Effektivität. Durch die Nuten ist auch hier mit einem besseren Ergebnis als mit der glatten Welle aus den vorherigen Versuchen zu rechnen. Zusätzlich besitzt die gezahnte Welle einen  $0,6\text{ mm}$  größeren Außendurchmesser. Hierdurch ergeben sich bei gleicher Drehzahl höhere Umfangsgeschwindigkeit, die auch wiederum einen positiven Effekt haben sollten. Die Ergebnisse der reinen Rotation sollten als präzise angesehen werden können, da die Gleichmäßigkeit des Spalts hier keinen Einfluss haben sollte. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.38 zu sehen ( $C_\mu = 0$ ). Wie auch bei den glatten Wellen in der Basiskonfiguration ist ein gleichmäßiges Abfallen des Widerstands zu beobachten. Hier ist die Reduzierung mit 12,6% rund drei mal größer als mit den glatten Wellen.



**Abbildung 3.38.:**  $C_W$  über  $n$  für unterschiedliche  $C_\mu$  mit gezahnter Welle bei  $Re = 50000$

Wie bereits erwähnt, sind die Ergebnisse vermutlich nicht durch eine periodische Aktuierung entstanden. Wie bei den glatten Walzen wird durch einen Spalt ausgeblasen. Jedoch ist nicht auszuschließen, dass die Walzengeometrie doch eine gewisse Periodizität in den Ausblasungsstrahl gibt. Getestet werden konnte dies nicht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.38 dargestellt. Aktuiert wurde hier mit einem Plenumsdruck von  $p_{Pl} = 10 \text{ kPa}$  und  $p_{Pl} = 20 \text{ kPa}$  was in diesem Fall  $C_\mu = 0,1$  und  $0,25$  entspricht. Eine Aktuierung durch reine Ausblasung ist aufgrund der Wellengeometrie an dieser Stelle nicht sinnvoll. Zu sehen ist eine maximale Widerstandsreduzierung von 36%. Zwar ist aus den Daten ersichtlich, dass sich der Widerstand mit steigender Drehzahl senkt, jedoch kann nicht herausgelesen werden, ob sich der Widerstand bei Einschalten der Walzen zunächst erhöht, wie schon oft im Laufe dieser Untersuchungen zu sehen war.

Betrachtet man die Leistungsersparnis in Abbildung 3.39 ist in vielen der vorangegangenen Fällen meist Verlust zu vermerken. Lediglich bei geringem  $C_\mu$  und kleiner Drehzahl ist ein Gewinn zu sehen.



**Abbildung 3.39.:**  $\Delta P / P_0$  über  $n$  für unterschiedliche  $C_\mu$  mit gezahnter Welle bei  $Re = 50000$

## 4. Zusammenfassung & Ausblick

In dieser Arbeit wurden Widerstandsmessungen für insgesamt vier verschiedene Konfiguration für ein Stumpfkörpermodell mit einer neuartigen Aktuierungsmethode gemacht. Die Aktuierungsmethode bestand aus Walzen und Ausblasungen, die sowohl getrennt als auch kombiniert untersucht wurden. Mittels Druckmessrächen wurden die Widerstandswerte für verschiedene Ausblasungsintensitäten und Walzenrotationsgeschwindigkeiten bestimmt. Die Daten wurden dann bezüglich investierter Energie, Leistungsersparnis und Synergyverhalten ausgewertet.

Es gelang durch den kombinierten Aktuierungsmechanismus bei konstanter Ausblasung eine Widerstandsreduzierung von bis zu 76%. Bei der Auswertung wurde deutlich, dass die Aktuierung durch Walzen im Gegensatz zur Ausblasung einen deutlich größeren Gewinn pro hinzugeführter Energie mit sich bringt. So ist die Widerstandsreduzierung pro  $C_{Power}$  der Walzen um bis zu 97% größer also bei der Ausblasung. Allerdings ist in vielen Aktuierungsfällen dieser Arbeit keine Leistungsersparnis durch die Widerstandsreduzierung vorhanden. Um die Leistungsersparnis zu verbessern, sollten weitere Untersuchungen bezüglich der optimalen Geometrien von Spalt und Walze getätigt werden.

Zur Auswertung von Synergieeffekten wurden die Widerstandsreduzierungen der kombinierten Aktuierung mit denen der reinen Ausblasung und der reinen Rotation der Walzen verglichen. Dabei konnte aufgezeigt werden, dass die Reduzierung pro Leistungseinheit der Walzen um 94% gesteigert werden konnte. Somit ist die Effektivität der Walzenaktuierung deutlich durch die Ausblasung gestiegen. Bei der Auswertung wurde aber ebenfalls ersichtlich, dass in einigen Fällen bei geringen Ausblasungsintensitäten die Walzen einen negativen Einfluss haben und den Widerstand anheben. Aus diesem Grund muss auf den Arbeitsbereich geachtet werden, der sich wahrscheinlich auch durch die Geometrien verschieben lässt.

Durch den Austausch der Walzen mit anderen, die Längsnuten besaßen, sollte eine periodische Aktuierung erfolgen. Die Walzen sollten bei Rotation den Ausblasungspalt öffnen und schließen. Erreicht werden konnte dies nicht, da der Ausblasungsstrom nicht mehr tangential sondern zerstreut austritt. Grund sind wahrscheinlich zu kleine Nuten, wodurch

der Spalt nicht komplett geöffnet war. Jedoch konnte durch die neue Geometrie der Walzen ein um 13% besseres Ergebnis bei reiner Rotation erzeugt werden als bei der zuvor genutzten glatten Walze.

# Literatur

- [1] Beaudoin, J.-F., Cadot, O. u. a.: „Drag reduction of a bluff body using adaptive control methods“. In: *Physics of Fluids*, Vol. 18, No. 085107 (2006).
- [2] Burnazzi, M.: Design of Efficient High-Lift Configurations with Coanda Flaps. Vieweg+Teubner, 2002.
- [3] Cattafesta, L. N. und Sheplak, M.: „Actuators for Active Flow Control“. In: *Annual Review of Fluid Mechanics* 43:247-72 (2011).
- [4] Choi, H., Jeon, W.-P. u. a.: „Control of Flow Over a Bluff Body“. In: *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 40 (2008), S. 113–139.
- [5] Freund, J. B. und Mungal, M.-G.: „Drag and Wake Modification of Axisymmetric Bluff Bodies Using Coanda Blowing“. In: *Journal of Aircraft*, Vol. 31, No. 3 (1994), S. 532–578.
- [6] Geropp, D. und Odenthal, H.-J.: „Drag reduction of motor vehicles by active flow control using the Coanda effect“. In: *Experiments in Fluids* 28, No. 74-85 (2000).
- [7] Günther, B., Thiele, F. u. a.: „Control of separation on the flap of a three-element high-lift configuration“. In: *AIAA paper 2007-265* (2007).
- [8] Hofmacher, T.: Einfluss von transitionsstreifen auf den Profilwiderstand bei kleinen Reynolds-Zahlen. Bachelorarbeit Nr.683. 2016.
- [9] Houghton, E. L. und Carpenter, P. W.: Aerodynamics for engineering students. Butterworth-Heinemann, 2003.
- [10] Hucho, W.-H.: Aerodynamik der stumpfen Körper. 2016.
- [11] J.Pfeiffer und King, R.: „Linear parameter-varying active flow control for a 3D bluff body exposed to cross-wind gusts“. In: *AIAA paper 2014-2406* (2014).
- [12] Koida, L., Kyriazis, N. u. a.: Verbesserung des Widerstandsbeiwertes durch verschiedene Klappenkonfigurationen am D-förmigen Stumpfkörper. Studentische Projektarbeit. 2018.
- [13] Modi, V. J.: „Moving surface boundary-layer control: a review“. In: *Journal of fluids and structures*, Vol. 11 (1997), S. 627–663.

- [14] Oswald, P.: Experimental investigations of active and passive drag-reducing devices over a D-shaped bluff body. 2017.
- [15] Pastoor, M., Henning, L. u. a.: „Feedback shear layer control for bluff body drag reduction“. In: *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 608 (2008), S. 161–196.
- [16] Petz, R. und Nitsche, W.: „Active Separation Control on the Flap of a Two-Dimensional Generic High-Lift Configuration“. In: *Journal of Aircraft*, Vol. 44, No. 3 (2007), S. 865–874.
- [17] Radespiel, R., Pfingsten, K.-C. u. a.: „Flow Analysis of Augmented High-Lift Systems“. In: *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*. Vol. 102. Springer, 2009.
- [18] Sayed, Y. E., Beck, N. u. a.: „Challenges in the experimental Quantification of the Momentum Coefficient of Circulation Controlled Wings“. In: () .

# **A. Anhang**

## **A.1. Widerstandsmessung Matlab Code**

```

clear all;
close all;

pressure_raw=load('G:\Messungen\Neue↖
Messungen\HK0_AktOben\Re_50000_HK0_AktOben_Pp120_RPM2500.txt');
pressure=mean(pressure_raw);

pressure_raw_plus=load('G:\Messungen\Neue↖
Messungen\HK0_AktOben\Re_50000_HK0_AktOben_Pp120_RPM2500_oben.txt');
pressure_plus=mean(pressure_raw_plus);

pressure_raw_minus=load('G:\Messungen\Neue↖
Messungen\HK0_AktOben\Re_50000_HK0_AktOben_Pp120_RPM2500_unten.txt');
pressure_minus=mean(pressure_raw_minus);

% separate pressures
total_pressure = pressure(1:1,34:55);
static_pressure = pressure(1:1,61:65);
static_pressure_plus = pressure_plus(1:1,61:65);
static_pressure_minus = pressure_minus(1:1,61:65);

% positions as designed (not measured)
position_pitot = [0:9:9*21]-94.5;
position_prandtl = [0:13.33:193.33] + 1.17-94.5;

C = zeros(1, length(static_pressure)+length(static_pressure_plus)+length↖
(static_pressure_minus));
C(1:3:end) = static_pressure_minus;
C(2:3:end) = static_pressure;
C(3:3:end) = static_pressure_plus;
static_pressure = C;

% fit total pressure
data = total_pressure;
pos = position_pitot;
[~,id] = min(data);
middle = pos(id);
beta = [0.001,-0.001,min(data),max(data),-middle];
formula1 = @(beta,x) (1+beta(1).* (x+beta(5)).^2) .* exp(beta(2).* (x+beta(5)).^2) *↖
(beta(3) - beta(4)) + beta(4);
beta1 = nlinfit(pos,data,formula1,beta);

% fit static pressure
data = static_pressure;
pos = position_prandtl;
beta = [min(data),max(data),beta1(5)];
formula2 = @(beta,x) (1+beta1(1).* (x+beta(3)).^2) .* exp(beta1(2).* (x+beta(3)).^2) *↖
(beta(1) - beta(2)) + beta(2);
beta2 = nlinfit(pos,data,formula2,beta);

cs = csaps(pos,data);
xx = linspace(min(position_pitot),max(position_pitot),1001);
fcs=@(arg) ppval(cs,arg);

```

```
% calculate Cd
dyn_pressure_fs = beta1(4) - beta2(2);
static_pressure_fs = beta2(2);
ref_length = 0.0534;

fun = @(x) (2 * sqrt((formula1(beta1,x) - fcs(x)) / dyn_pressure_fs) .* (1 - sqrt(
((formula1(beta1,x) - static_pressure_fs) / dyn_pressure_fs))));
Cd = integral(fun,min(position_prandtl),max(position_prandtl))/1000/ref_length;

x = linspace(min(position_pitot),max(position_pitot),1001);
figure(1)
set(figure(1),'units','normalized','outerposition',[0 0 0.5 0.75])
axes1 = axes('Parent',figure(1));
hold(axes1,'on');
set(axes1,'FontSize',30,'LineWidth',1.5);
box(axes1,'on');
ylim(axes1,[-180 -20])
plot(position_pitot,total_pressure,'x',x,formula1(beta1,x),'LineWidth',1.5,
'color','0.85,0.33,0.1','MarkerSize',15)
plot(position_prandtl,static_pressure,'x',x,fcs(x),'LineWidth',1.5,
'color','0,0.45,0.74','MarkerSize',15)
xlabel('y/h [-]')
ylabel('p [Pa]')
%xlim([0 190])
legend1 = legend(axes1,'show');
set(legend1,'NumColumns',1,'Location','southwest','FontSize',22);
legend('P_{t} Messdaten','P_{t} fit','P Messdaten','P fit')
%title(['Cd: ',num2str(Cd)])
set(gca,'LooseInset',get(gca,'TightInset'))
```

## A.2. Datenblätter

# Brushless motor with integrated electronics

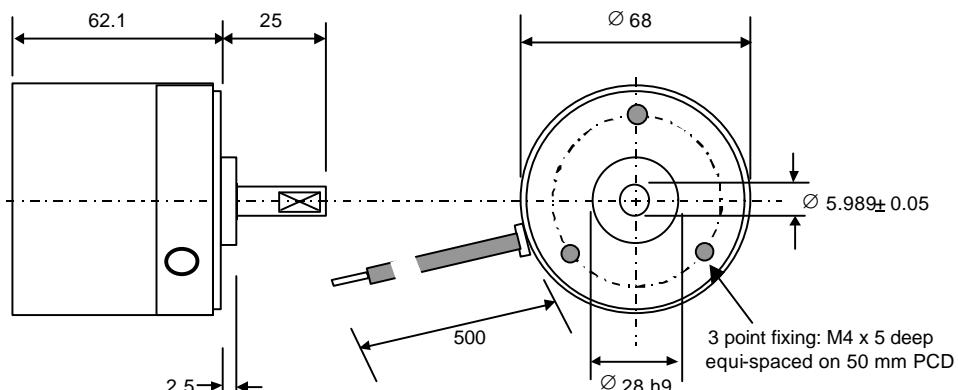
**BLDC 58**

## Description

The BLDC 58 is a variable speed 24 Vdc brushless motor with integrated drive electronics providing up to 50 watts continuous output power and a variable speed proportional to a 0-5 V control signal. The unit provides a compact solution to a variety of light industrial applications such as conveyor drives, paper feed and pump drives. Scientific applications include stirring equipment, peristaltic pumps, mixing machines, as well as any variable speed application that requires long maintenance free life and operating speeds from 100 to 3000 rpm. The motor's design incorporates an external rotor and magnet system which provides particularly smooth running, high grade bearings and drive electronics, all of which are housed in an enclosure suitable for use up to IP55 operating conditions. The inclusion of the drive electronics within the motor greatly simplifies the use of the motor as well as reducing overall system cost.



## Dimensions: mm



## Specification

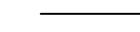
Order Code		<b>BLDC58-35L</b>	<b>BLDC58-50L</b>
Continuous output power	Watts	35	50
Maximum speed	rpm	3,650	3,650
Minimum regulated speed	rpm	≤ 100	≤ 100
Maximum speed @ rated torque	rpm	3,000	3,000
Rated Torque	Nm	0.11	0.17
Rotor inertia	Kgcm²	1.2	1.2
Motor Supply voltage	Vdc	24	24
Motor supply current	Amps	1.9	2.9
Analogue speed control signal	V/1000 rpm	1.0	1.0
Alternative digital speed control signal	kHz	1 – 14.5	1 – 14.5
Digital output speed monitor	ppr	36	36
Internal Over-temperature protection		standard	standard
Bearing type		Ball	Ball

## Connections:

Motor supply voltage: (14 – 32 Vdc)

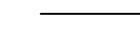
### Lead colours

red



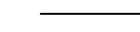
Motor supply Ground

black



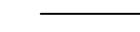
Analogue speed control input (0-4V )

white



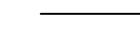
Frequency generator signal (36 ppr )

green

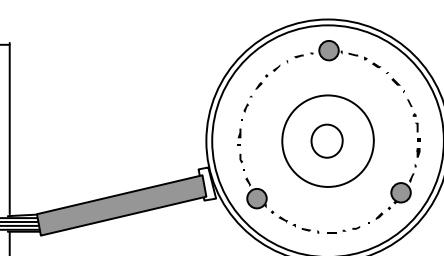
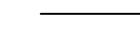


Direction control input \*

brown



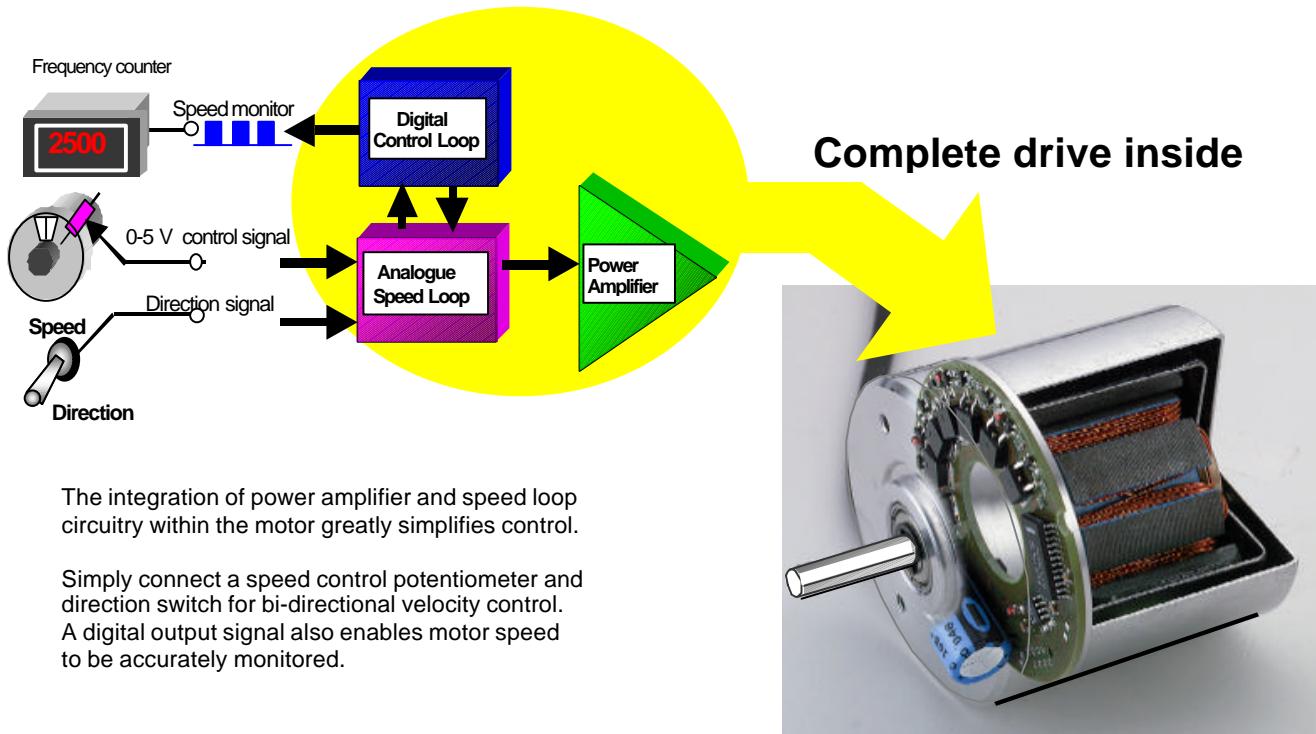
Lead wire Shield connect to motor ground



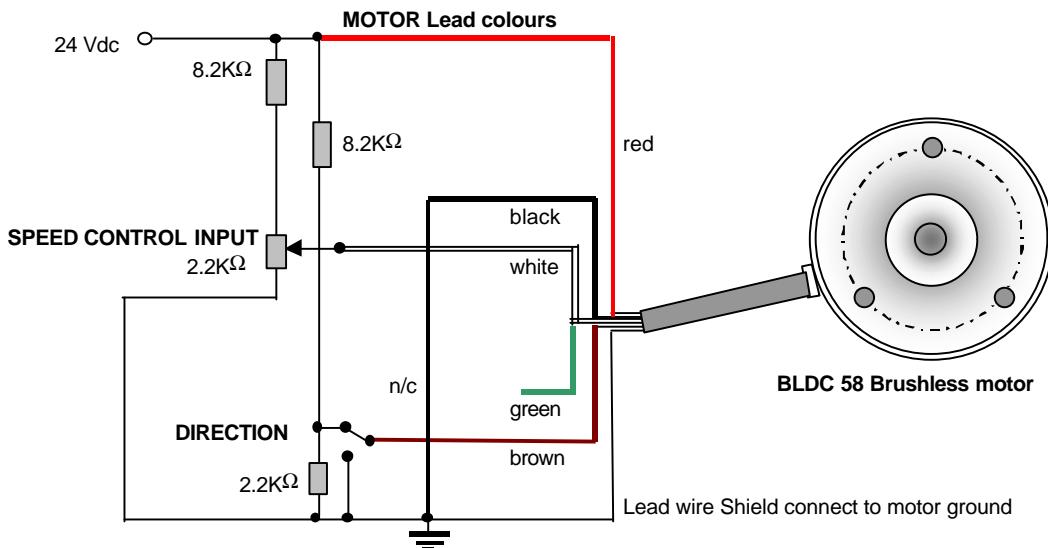
**BLDC 58 Brushless motor**

Note\* Do not leave open circuit

## BLDC 58: Integrated electronics for complete drive solution



### BLDC58 Typical connections for simple speed control



# SK5 1,5 44

## 3D-Ansicht

Datum 21.12.2017



Seite 1 von 2

Klicken Sie auf das Modell, um die interaktiven CAD-Funktionen zu aktivieren

### Ihre Konfiguration

#### Sicherheitskupplungen SK / ST / SL

Modell	SK5 1,5 44
Funktion	Winkelsynchron
Einstellbereich von - bis (Nm)	0,8-1,5
TKn	0,8
Gesamtlänge (mm)	44
Schaltringdurchmesser (mm)	23
Masseinheit Bohrung links	Bohrungsdurchmesser in mm
Nabenlänge, links (mm)	14
Bohrungsdurchmesser, links (H7/mm)	6
Masseinheit Bohrung rechts	Bohrungsdurchmesser in mm
Nabenlänge, rechts (mm)	11
Bohrungsdurchmesser (H7/mm)	6

### CAD-Dateien öffnen/speichern

Datei öffnen: Doppelklick auf ein Symbol

Datei speichern: Klick mit der rechten Maustaste

SK5\_1\_5\_44\_W\_6\_6\_0\_8\_0\_8\_1\_5.dxf

SK5\_1\_5\_44\_W\_6\_6\_0\_8\_0\_8\_1\_5.dwg

### Ihr Kontakt für Fragen

Bei Anfragen kommerzieller oder technischer Art, stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung.  
Sie finden Ihren direkten R+W Kontakt auf unserer Internetseite mit folgendem Link:

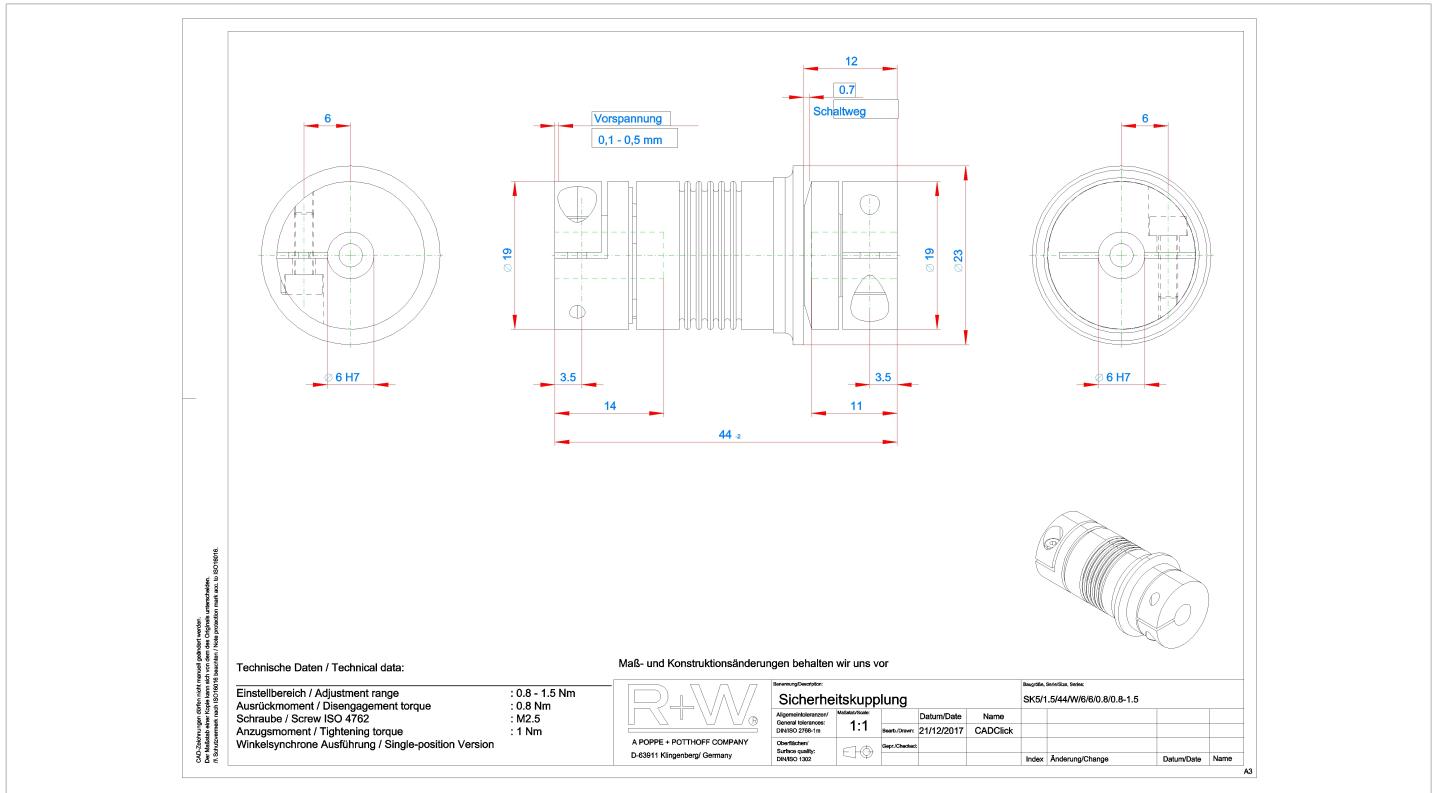
[www.rw-kupplungen.de/ansprechpartner/national](http://www.rw-kupplungen.de/ansprechpartner/national)

# SK5 1,5 44

## Maßzeichnungen

Datum 21.12.2017

Seite 2 von 2



## SPECIFICATIONS

# USB-6210

16 AI (16-Bit, 250 kS/s), 4 DI, 4 DO USB Multifunction I/O Device

## Definitions

---

*Warranted* specifications describe the performance of a model under stated operating conditions and are covered by the model warranty.

The following characteristic specifications describe values that are relevant to the use of the model under stated operating conditions but are not covered by the model warranty.

- *Typical* specifications describe the performance met by a majority of models.
- *Nominal* specifications describe an attribute that is based on design, conformance testing, or supplemental testing.

Specifications are *Typical* unless otherwise noted.

## Conditions

---

Specifications are valid at 25 °C unless otherwise noted.

## Analog Input

---

Number of channels	8 differential or 16 single ended
ADC resolution	16 bits
DNL	No missing codes guaranteed
INL	Refer to the <a href="#">AI Absolute Accuracy</a> section
Sample rate	
Single channel maximum	250 kS/s
Multichannel maximum (aggregate)	250 kS/s
Minimum	0 S/s
Timing accuracy	50 ppm of sample rate
Timing resolution	50 ns
Input coupling	DC

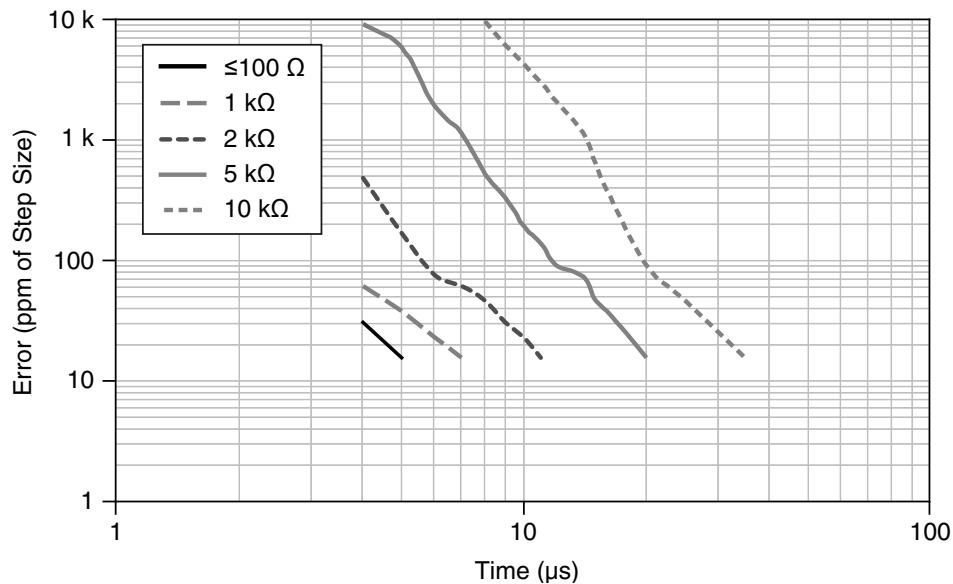
Input range	$\pm 0.2\text{ V}$ , $\pm 1\text{ V}$ , $\pm 5\text{ V}$ , $\pm 10\text{ V}$
Maximum working voltage for analog inputs (signal + common mode)	$\pm 10.4\text{ V}$ of AI GND
CMRR (DC to 60 Hz)	100 dB
Input impedance	
Device on	
AI+ to AI GND	>10 G $\Omega$ in parallel with 100 pF
AI- to AI GND	>10 G $\Omega$ in parallel with 100 pF
Device off	
AI+ to AI GND	1,200 $\Omega$
AI- to AI GND	1,200 $\Omega$
Input bias current	$\pm 100\text{ pA}$
Crosstalk (at 100 kHz)	
Adjacent channels	-75 dB
Non-adjacent channels	-90 dB
Small signal bandwidth (-3 dB)	450 kHz
Input FIFO size	4,095 samples
Scan list memory	4,095 entries
Data transfers	USB Signal Stream, programmed I/O
Ovvovoltage protection for all analog input and sense channels	
Device on	$\pm 30\text{ V}$ for up to two AI pins
Device off	$\pm 20\text{ V}$ for up to two AI pins
Input current during overvoltage condition	$\pm 20\text{ mA}$ maximum/AI pin

## Settling Time for Multichannel Measurements

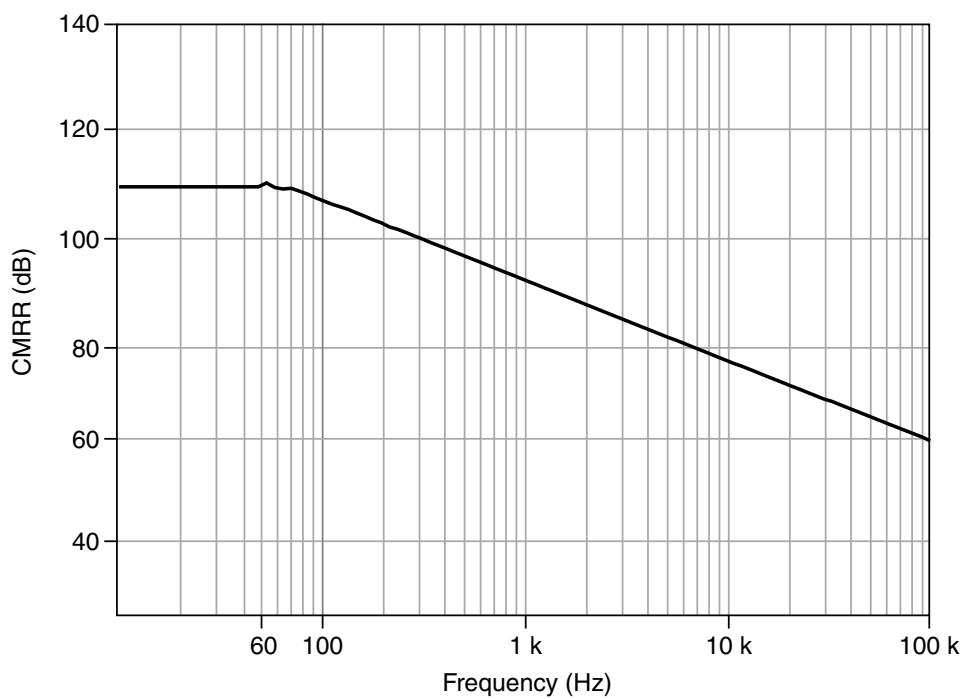
Accuracy, full-scale step, all ranges	
$\pm 90\text{ ppm}$ of step ( $\pm 6\text{ LSB}$ )	4 $\mu\text{s}$ convert interval
$\pm 30\text{ ppm}$ of step ( $\pm 2\text{ LSB}$ )	5 $\mu\text{s}$ convert interval
$\pm 15\text{ ppm}$ of step ( $\pm 1\text{ LSB}$ )	7 $\mu\text{s}$ convert interval

# Typical Performance Graphs

**Figure 1.** Settling Error versus Time for Different Source Impedances



**Figure 2.** AI CMRR



## AI Absolute Accuracy (Warranted)



**Note** Accuracies listed are valid for up to one year from the device external calibration.



**Note** The input/output channels of this device are not protected for electromagnetic interference due to functional reasons. As a result, this device may experience

reduced measurement accuracy or other temporary performance degradation when connected cables are routed in an environment with radiated or conducted radio frequency electromagnetic interference. To ensure that this device functions within specifications in its operational electromagnetic environment and to limit radiated emissions, care should be taken in the selection, design, and installation of measurement probes and cables.

**Table 1. AI Absolute Accuracy**

Nominal Range Positive Full Scale (V)	Nominal Range Negative Full Scale (V)	Residual Gain Error (ppm of Reading)	Residual Offset Error (ppm of Range)	Offset Tempco (ppm of Range/°C)	Random Noise, $\sigma$ (µVrms)	Absolute Accuracy at Full Scale (µV)	Sensitivity (µV)
10	-10	75	20	34	229	2,690	91.6
5	-5	85	20	36	118	1,410	47.2
1	-1	95	25	49	26	310	10.4
0.2	-0.2	135	40	116	12	88	4.8



**Note** Sensitivity is the smallest voltage change that can be detected. It is a function of noise.

Gain tempco	7.3 ppm/°C
Reference tempco	5 ppm/°C
INL error	76 ppm of range

## AI Absolute Accuracy Equation

$$\text{AbsoluteAccuracy} = \text{Reading} \cdot (\text{GainError}) + \text{Range} \cdot (\text{OffsetError}) + \text{NoiseUncertainty}$$

$$\begin{aligned} \text{GainError} &= \text{ResidualAIGainError} + \text{GainTempco} \cdot (\text{TempChangeFromLastInternalCal}) \\ &+ \text{ReferenceTempco} \cdot (\text{TempChangeFromLastExternalCal}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{OffsetError} &= \text{ResidualAIOffsetError} + \text{OffsetTempco} \cdot \\ &(\text{TempChangeFromLastInternalCal}) + \text{INLError} \end{aligned}$$

$$\text{NoiseUncertainty} = \frac{\text{Random Noise} \cdot 3}{\sqrt{100}} \text{ for a coverage factor of } 3\sigma \text{ and averaging} \\ 100 \text{ points.}$$

## AI Absolute Accuracy Example

Absolute accuracy at full scale on the analog input channels is determined using the following assumptions:

- TempChangeFromLastExternalCal = 10 °C
- TempChangeFromLastInternalCal = 1 °C
- number\_of\_readings = 100
- CoverageFactor = 3 σ

For example, on the 10 V range, the absolute accuracy at full scale is as follows:

$$\text{GainError} = 75 \text{ ppm} + 7.3 \text{ ppm} \cdot 1 + 5 \text{ ppm} \cdot 10 = 132 \text{ ppm}$$

$$\text{OffsetError} = 20 \text{ ppm} + 34 \text{ ppm} \cdot 1 + 76 \text{ ppm} = 130 \text{ ppm}$$

$$\text{NoiseUncertainty} = \frac{229 \text{ } \mu\text{V} \cdot 3}{\sqrt{100}} = 68.7 \text{ } \mu\text{V}$$

$$\text{AbsoluteAccuracy} = 10 \text{ V} \cdot (\text{GainError}) + 10 \text{ V} \cdot (\text{OffsetError}) + \text{NoiseUncertainty} = \\ 2,690 \text{ } \mu\text{V}$$

## Digital I/O and PFI

### Static Digital I/O Characteristics

Number of digital input channels	4 (PFI <0..3>/P0.<0..3>)
Number of digital output channels	4 (PFI <4..7>/P1.<0..3>)
Ground reference	D GND
Pull-down resistor	47 kΩ ±1%
Input voltage protection	±20 V on up to 8 pins <sup>1</sup>

### PFI Functionality

#### PFI <0..3>/Port 0

Functionality	Static digital input, timing input
Debounce filter settings	125 ns, 6.425 μs, 2.56 ms, disable; high and low transitions; selectable per input

#### PFI <4..7>/Port 1

Functionality	Static digital output, timing output
Timing output sources	Many AI, counter timing signals

<sup>1</sup> Stresses beyond those listed under *Input voltage protection* may cause permanent damage to the device.

# Maximum Operating Conditions

I <sub>OL</sub> output low current	16 mA maximum
I <sub>OH</sub> output high current	-16 mA maximum

## Digital Input Characteristics

Level	Minimum	Maximum
V <sub>IL</sub> input low voltage	0 V	0.8 V
V <sub>IH</sub> input high voltage	2 V	5.25 V
I <sub>IL</sub> input low current (V <sub>in</sub> = 0 V)	-	-10 µA
I <sub>IH</sub> input high current (V <sub>in</sub> = 5 V)	-	120 µA

## Digital Output Characteristics

Parameter	Voltage Level	Current Level
V <sub>OL</sub>	0.6 V	6 mA
V <sub>OH</sub>	2.7 V	-16 mA
V <sub>OH</sub>	3.8 V	-6 mA

## General-Purpose Counters/Timers

Number of counter/timers	2
Resolution	32 bits
Counter measurements	Edge counting, pulse, semi-period, period, two-edge separation
Position measurements	X1, X2, X4 quadrature encoding with Channel Z reloading; two-pulse encoding
Output applications	Pulse, pulse train with dynamic updates, frequency division, equivalent time sampling
Internal base clocks	80 MHz, 20 MHz, 0.1 MHz
External base clock frequency	0 MHz to 20 MHz
Base clock accuracy	50 ppm

Inputs	Gate, Source, HW_Arm, Aux, A, B, Z, Up_Down
Routing options for inputs	PFI <0..3>, many internal signals
FIFO	1,023 samples
Data transfers	USB Signal Stream, programmed I/O

## Frequency Generator

Number of channels	1
Base clocks	10 MHz, 100 kHz
Divisors	1 to 16
Base clock accuracy	50 ppm

Output can be available on any output PFI terminal.

## External Digital Triggers

Source	PFI <0..3>
Polarity	Software-selectable for most signals
Analog input function	Start Trigger, Reference Trigger, Pause Trigger, Sample Clock, Convert Clock, Sample Clock Timebase
Counter/timer function	Gate, Source, HW_Arm, Aux, A, B, Z, Up_Down

## Bus Interface

USB	USB 2.0 Hi-Speed or full-speed <sup>2</sup>
USB Signal Stream	4, can be used for analog input, counter/timer 0, counter/timer 1

<sup>2</sup> If you are using an USB M Series device in full-speed mode, device performance will be lower and you will not be able to achieve maximum sample/update rates.

# Current Limits

+5 V terminal as output<sup>3</sup>

Voltage	4.6 V to 5.2 V
Current (internally limited)	50 mA maximum, shared with digital outputs

+5 V terminal as input<sup>3</sup>

Voltage	4.75 V to 5.35 V
Current	350 mA maximum, self-resetting fuse



**Caution** Do not exceed 16 mA per DIO pin.

Protection  $\pm 10$  V

# Power Requirements

Input voltage on USB port 4.5 V to 5.25 V in configured state

Maximum inrush current 500 mA

No load typical current 320 mA at 4.5 V

Maximum load

Typical current 400 mA at 4.5 V

Suspend current 260  $\mu$ A typical

# Physical Characteristics

Dimensions (includes connectors) 16.9 cm  $\times$  9.4 cm  $\times$  3.1 cm  
(6.65 in.  $\times$  3.70 in.  $\times$  1.20 in.)

Weight 206 g (7.2 oz)

I/O connectors 2 16-position combicon

USB connector Series B receptacle

Screw terminal wiring 16 AWG to 28 AWG

Torque for screw terminals 0.22 N · m to 0.25 N · m  
(2.0 lb · in. to 2.2 lb · in.)

To clean the device, wipe with a dry towel.

<sup>3</sup> These devices have a self-resetting fuse that opens when current exceeds this specification.

# Calibration

---

Recommended warm-up time 15 minutes

Calibration interval 1 year

---

## Environmental

---

Operating temperature 0 °C to 45 °C

Storage temperature -20 °C to 70 °C

Humidity 10% RH to 90% RH, noncondensing

Maximum altitude 2,000 m

Pollution Degree 2

---

Indoor use only.

## Safety Voltages

---

Connect only voltages that are below these limits.

Channel-to-earth ground 11 V, Measurement Category I

---

Measurement Category I is for measurements performed on circuits not directly connected to the electrical distribution system referred to as MAINS voltage. MAINS is a hazardous live electrical supply system that powers equipment. This category is for measurements of voltages from specially protected secondary circuits. Such voltage measurements include signal levels, special equipment, limited-energy parts of equipment, circuits powered by regulated low-voltage sources, and electronics.



**Caution** Do not use for measurements within Categories II, III, or IV.



**Note** Measurement Categories CAT I and CAT O (Other) are equivalent. These test and measurement circuits are not intended for direct connection to the MAINS building installations of Measurement Categories CAT II, CAT III, or CAT IV.

# Safety

---

This product is designed to meet the requirements of the following electrical equipment safety standards for measurement, control, and laboratory use:

- IEC 61010-1, EN 61010-1
- UL 61010-1, CSA C22.2 No. 61010-1



**Note** For UL and other safety certifications, refer to the product label or the [Online Product Certification](#) section.

# Electromagnetic Compatibility

---

This product meets the requirements of the following EMC standards for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use; for radio equipment; and for telecommunication terminal equipment:

- EN 61326-1 (IEC 61326-1): Class A emissions; Basic immunity
- EN 55011 (CISPR 11): Group 1, Class A emissions
- EN 55022 (CISPR 22): Class A emissions
- EN 55024 (CISPR 24): Immunity
- AS/NZS CISPR 11: Group 1, Class A emissions
- AS/NZS CISPR 22: Class A emissions
- FCC 47 CFR Part 15B: Class A emissions
- ICES-001: Class A emissions



**Note** In the United States (per FCC 47 CFR), Class A equipment is intended for use in commercial, light-industrial, and heavy-industrial locations. In Europe, Canada, Australia and New Zealand (per CISPR 11) Class A equipment is intended for use only in heavy-industrial locations.



**Note** Group 1 equipment (per CISPR 11) is any industrial, scientific, or medical equipment that does not intentionally generate radio frequency energy for the treatment of material or inspection/analysis purposes.



**Note** For EMC declarations and certifications, and additional information, refer to the [Online Product Certification](#) section.

# CE Compliance

---

This product meets the essential requirements of applicable European Directives, as follows:

- 2014/35/EU; Low-Voltage Directive (safety)
- 2014/30/EU; Electromagnetic Compatibility Directive (EMC)
- 2011/65/EU; Restriction of Hazardous Substances (RoHS)

# Online Product Certification

---

Refer to the product Declaration of Conformity (DoC) for additional regulatory compliance information. To obtain product certifications and the DoC for this product, visit [ni.com/certification](http://ni.com/certification), search by model number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.

## Environmental Management

---

NI is committed to designing and manufacturing products in an environmentally responsible manner. NI recognizes that eliminating certain hazardous substances from our products is beneficial to the environment and to NI customers.

For additional environmental information, refer to the *Minimize Our Environmental Impact* web page at [ni.com/environment](http://ni.com/environment). This page contains the environmental regulations and directives with which NI complies, as well as other environmental information not included in this document.

## Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)



**EU Customers** At the end of the product life cycle, all NI products must be disposed of according to local laws and regulations. For more information about how to recycle NI products in your region, visit [ni.com/environment/weee](http://ni.com/environment/weee).

## 电子信息产品污染控制管理办法（中国 RoHS）



**中国客户** National Instruments 符合中国电子信息产品中限制使用某些有害物质指令 (RoHS)。关于 National Instruments 中国 RoHS 合规性信息, 请登录 [ni.com/environment/rohs\\_china](http://ni.com/environment/rohs_china)。(For information about China RoHS compliance, go to [ni.com/environment/rohs\\_china](http://ni.com/environment/rohs_china).)

Information is subject to change without notice. Refer to the *NI Trademarks and Logo Guidelines* at [ni.com/trademarks](http://ni.com/trademarks) for information on NI trademarks. Other product and company names mentioned herein are trademarks or trade names of their respective companies. For patents covering NI products/technology, refer to the appropriate location: **Help»Patents** in your software, the `patents.txt` file on your media, or the *National Instruments Patent Notice* at [ni.com/patents](http://ni.com/patents). You can find information about end-user license agreements (EULAs) and third-party legal notices in the readme file for your NI product. Refer to the *Export Compliance Information* at [ni.com/legal/export-compliance](http://ni.com/legal/export-compliance) for the NI global trade compliance policy and how to obtain relevant HTS codes, ECCNs, and other import/export data. NI MAKES NO EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES AS TO THE ACCURACY OF THE INFORMATION CONTAINED HEREIN AND SHALL NOT BE LIABLE FOR ANY ERRORS. U.S. Government Customers: The data contained in this manual was developed at private expense and is subject to the applicable limited rights and restricted data rights as set forth in FAR 52.227-14, DFAR 252.227-7014, and DFAR 252.227-7015.

© 2015—2017 National Instruments. All rights reserved.

375194D-01 September 22, 2017